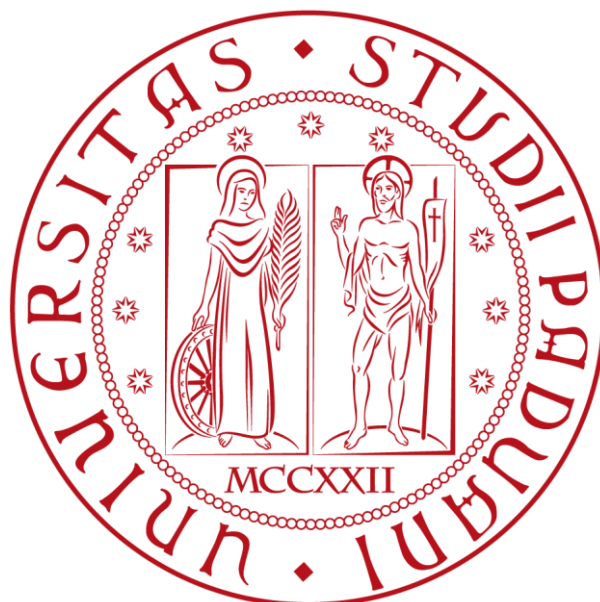


UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

SCUOLA DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE



ELABORATO FINALE

Fotovoltaico a Concentrazione: le Celle Multigiunzione

Relatore:

Prof Tenti Paolo

Candidato:

Merotto Simone

23/09/13

Anno Accademico 2012/2013

Indice

Introduzione.	7
1 Radiazione Solare.	9
2 Elementi di Fisica	11
2.1 Effetto Fotovoltaico.	11
2.2 Cella Solare.	12
3 Tipologie di Pannelli Fotovoltaici	14
3.1 Silicio Monocristallino.	14
3.2 Silicio Policristallino.	14
3.3 Silicio Amorfo.	15
3.4 A Film Sottile.	16
3.5 A Multigiunzione.	19
4 Fotovoltaico a Concentrazione	21
4.1 L'impianto Fotovoltaico a Concentrazione.	21
4.1.1 Ricevitore Solare: Cella e Sistema di Dissipazione.	22
4.1.2 Concentratore Solare.	25
4.1.3 Sistema di Tracking e Inverter.	28
5 Cella a Multigiunzione	32
5.1 Caratteristiche.	32
5.2 Processo Produttivo.	33
5.3 Tipologie Costruttive 3-Junction Cell.	35
5.3.1 Lattice-Matched.	35
5.3.2 Metamorphic e Inverted Metamorphic.	37
5.4 4-Junction, 5-Junction e 6-Junction Cell	39
Conclusioni.	41
Bibliografia e Sitografia.	42

Indice delle Figure

Figura 1: Spettro solare

Figura 2: Gradazione solare europea su piano orizzontale

Figura 3: Livelli di bandgap tra isolanti, semiconduttori e conduttori

Figura 4: Schema semplificato cella fotovoltaica

Figura 5: Schema elettrico cella solare

Figura 6: Aspetti delle varie celle in silicio

Figura 7: Film sottile realizzato con il Tellururo di Cadmio

Figura 8: Film sottile realizzato con Rame Indio Gallio di Selenio

Figura 9: Cella organica ibrida

Figura 10: Cella a multigiunzione

Figura 11: Impianto fotovoltaico di tipo Dense-Array

Figura 12: Dimensioni a confronto tra cella multigiunzione e cella monogiunzione in silicio

Figura 13: Efficienza in funzione della concentrazione al variare della temperatura

Figura 14: Sistema di dissipazione passivo

Figura 15: Principio di funzionamento concentratore solare

Figura 16: Forma tipica lente di Fresnel

Figura 17: Struttura e funzionamento lente di Fresnel

Figura 18: Impianto CPV con concentratore parabolico a specchi multipli

Figura 19: Sistema di tracking a due assi

Figura 20: Sistema di posizionamento di un inseguitore solare

Figura 21: Inverter installato sulla struttura di sostegno

Figura 22: Grafico MPP di una cella solare

Figura 23: Struttura cella multigiunzione

Figura 24: Assorbimento spettro luminoso nei vari layer con bandgaps decrescenti

Figura 25: Processo Crescita Cristallina mediante OMVPE

Figura 26: Struttura Cella Multigiunzione Lattice-Matched

Figura 27: Grafico Radiazione Luminosa e Lunghezza d'onda

Figura 28: Schema fisico cella multigiunzione Lattice-Matched

Figura 29: Circuito elettrico equivalente

Figura 30: *Struttura Lattice-Matched e Lattice Mismatched a confronto*

Figura 31: *Struttura di una Inverted Metamorphic (IMM) Cell*

Figura 32: *Due configurazioni di 3-junction cell Lattice-Mismatched a struttura invertita: (a) crescita in entrambe le direzioni di un substrato trasparente di GaAs; (b) crescita sul retro di uno substrato di Ge o GaAs rimosso poi durante la costruzione della cella*

Figura 33: *Sezione interna di una tipica 4-junction cell*

Figura 34: *Comparativa struttura Cella Multigiunzione 3,5,6-junction cell con relativi valori teorici di efficienza*

Introduzione

Viviamo in una società sempre più energivora: di anno in anno i consumi mondiali di energia sono sempre cresciuti con un trend che nell'ultimo decennio ha fatto segnare un + 24,8%. E nei prossimi tre decenni il consumo mondiale di energia potrebbe aumentare addirittura del 56% a causa della crescita dei paesi in via di sviluppo. Attualmente rimangono sempre i combustibili fossili la principale fonte di energia, ma la loro quantità limitata li sta rendendo sempre più costosi. Per non parlare dell'inquinamento atmosferico che sta raggiungendo valori record in Cina e India causando migliaia di morti ogni anno. Per questi motivi, con i nuovi piani energia e con il trattato stabilito dal Protocollo di Kyoto, ci si sta spingendo verso una sempre maggior produzione di energia da fonti rinnovabili e sostenibili e di conseguenza verso una diminuzione dell'emissioni nocive. Infatti, con l'attuazione da parte dell'UE del Piano 20 20 20, i paesi dell'Unione Europea dovranno, entro il 2020, ridurre del 20% le emissioni dei gas serra, incrementare fino a raggiungere il 20% la quota di energia prodotta da fonti rinnovabili e infine portare al 20% il risparmio energetico [1].

È molto improbabile che una sola fonte rinnovabile possa risolvere il problema energetico e permettere ai Paesi dell'UE di soddisfare i parametri del Piano 20 20 20, e quindi bisognerà sviluppare e incrementare la produzione di ogni tipologia di fonte rinnovabile. Tra queste il fotovoltaico potrà darà sicuramente un forte contributo: nata nel 1839 quando Edmond Becquerel scoprì che immergendo due lamine di bronzo in un liquido esposto alla luce solare si generava corrente elettrica, la cella fotovoltaica ha subito notevoli miglioramenti e abbassamenti dei costi rendendo gli impianti fotovoltaici una scelta appetibile in svariate regioni del mondo contraddistinte da un buon irraggiamento solare.

Allo stato attuale però il costo della tecnologia fotovoltaica non è sufficientemente basso per competere con la produzione di energia da altre fonti. Il costo del fotovoltaico deriva per il 70% dai materiali per la realizzazione dei moduli: quindi il costo delle celle incide in modo preponderante sul costo finale per watt installato. Nonostante questo è per merito dei suoi numerosi vantaggi che il settore della ricerca e dello sviluppo di nuove soluzioni che la rendano conveniente e più accessibile non ha mai smesso di fermarsi: è una fonte diffusa, non inquinante e gli impianti possono essere installati un po' ovunque grazie alla loro modularità. Tali sistemi quindi ben si adattano alla generazione di energia in modo delocalizzato, anche in aree difficilmente raggiungibili dalla rete di distribuzione elettrica, quali ad esempio aree desertiche. Inoltre i costi di mantenimento sono relativamente bassi e la durata dell'impianto supera i 20 anni, per questo c'è margine per ammortizzare i costi e per ottenere un costo del kWh prodotto competitivo con le altre fonti.

Proprio per diminuire i materiali costosi e permettere alla tecnologia che sfrutta l'irraggiamento solare di competere al meglio con le altre fonti rinnovabili, la ricerca ha condotto al fotovoltaico a concentrazione, una tecnologia che potrebbe rappresentare una delle alternative più promettenti per la diffusione dell'energia solare fotovoltaica come fonte di energia su grande scala. L'idea del fotovoltaico a concentrazione è quella di concentrare la luce su una nuova tipologia di celle solari, piccolissime e molto sottili, risparmiando così sul costo del materiale per produrle: le celle a multi giunzione. Infatti, grazie a questa nuova tecnologia di celle, aumentando il flusso luminoso per area si aumenta la corrente prodotta con una legge che in prima approssimazione si può assumere lineare e di conseguenza si raggiungono efficienze più elevate, il tutto senza cali drastici di

rendimento dovuti alle alte temperature generate dalla concentrazione e senza danneggiare la durata dei moduli fotovoltaici.

Purtroppo questa nuova tipologia di impianti, decisamente più complessi di un qualsiasi impianto piano fotovoltaico, comporta una nuova serie di problematiche, sia scientifiche sia tecnologiche, che vanno dal processo produttivo per la realizzazione della cella a multigiunzione, al controllo elettronico della meccanica di strutture mobili, passando al corretto dissipamento dell'eccesso di calore generato. Senza dimenticare i costi di manutenzione necessari al mantenimento della produttività dell'impianto: continua pulizia del sistema adibito al concentramento solare, mantenimento dei motori e dei meccanismi meccanici con ricalibratura del sistema addetto alla tracciatura solare.

Capitolo 1

Radiazione Solare

La radiazione solare è l'energia elettromagnetica emessa dal sole durante le reazioni termonucleari di fusione dell'idrogeno. Quando si parla di spettro solare si intende la rappresentazione dell'intensità della radiazione elettromagnetica emessa da una sorgente in funzione della lunghezza d'onda. Tipicamente si suddivide lo spettro solare in tre intervalli ben definiti:

- Ultravioletto, caratterizzato da lunghezze d'onda tra 0.2-0.38 μm e comprendente i raggi gamma, i raggi x e gli ultravioletti; corrisponde al 6.4% dell'energia totale compresa nello spettro;
- Visibile, avente lunghezze d'onda tra 0.38-0.78 μm (il colore passa dal viola al rosso man mano che aumenta la lunghezza d'onda); corrisponde al 48% dello spettro totale;
- Infrarosso, comprendente le lunghezze d'onda nell'intervallo 0.78-10 μm e costituito da onde radio, microonde e raggi infrarossi; corrisponde al rimanente 45.6% [2].

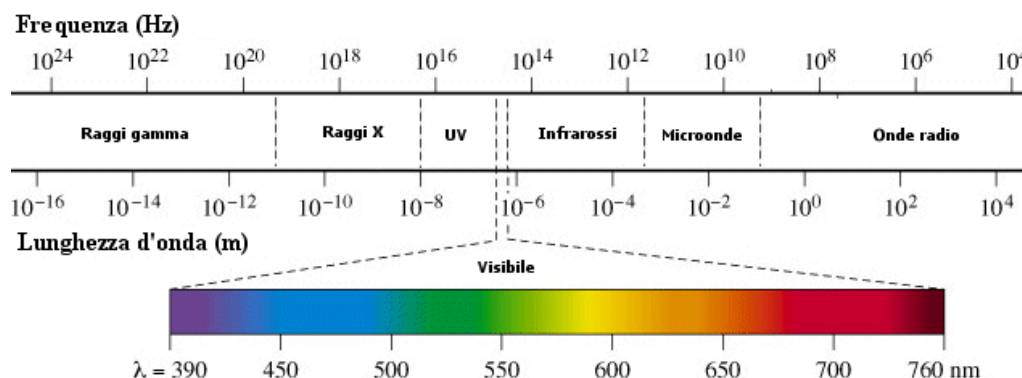


Figura 1 Spettro solare

La banda di pertinenza per lo sfruttamento dell'energia solare da parte di celle fotovoltaiche va dai 0,3 μm ai 1,8 μm (per le celle III-V multigiunzione), che corrisponde al 96% della potenza radiativa che giunge al suolo.

Nel suo viaggio dal sole alla terra, lo spettro elettromagnetico viene alterato dall'atmosfera terrestre: vengono infatti assorbite quasi tutte le radiazioni con lunghezza d'onda inferiori a 0,3 μm , quelle con lunghezza d'onda comprese tra 0,9 μm e qualche millimetro e infine quelle aventi lunghezza superiore a una cinquantina di metri. Questi assorbimenti sono dovuti alla composizione a strati dell'atmosfera, ciascuno dei quali è responsabile dell'incameramento di radiazioni di una specifica lunghezza d'onda. Inoltre, sempre l'atmosfera, attenua parzialmente tutte le radiazioni a causa dello scattering di Rayleigh: si tratta di un processo di collisione tra alcune lunghezze d'onda della luce e le molecole d'aria che rende il cielo color azzurro poiché la traiettoria della luce viene alterata dopo gli urti.

Dopo questi vari assorbimenti e riflessioni, la radiazione solare raggiunge la superficie terrestre distinguendosi in tre tipologie di fasci luminosi: diretta, diffusa e riflessa. Mentre la radiazione diretta colpisce una qualsiasi superficie con un unico e ben definito angolo di incidenza, quella diffusa incide su tale superficie con vari angoli. Occorre ricordare che quando la radiazione diretta non può colpire una superficie a causa della presenza di un ostacolo, l'area ombreggiata non si trova

completamente oscurata grazie al contributo della radiazione diffusa. Questa fatto assume molta importanza per i sistemi fotovoltaici piani che possono operare anche in presenza della sola radiazione diffusa. A differenza di questi però i sistemi fotovoltaici a concentrazione lavorano solamente in condizioni di irraggiamento diretto.

Le proporzioni di radiazione riflessa, diffusa e diretta ricevuta da una superficie dipendono dalle condizioni meteorologiche, dall'inclinazione della superficie rispetto al piano orizzontale (bisogna tener conto della radiazione riflessa dal terreno e quindi varia a seconda delle latitudini) e dalla presenza di superfici riflettenti. Viene chiamata radiazione globale al suolo la somma della radiazione diretta e della radiazione diffusa. L'irraggiamento extraterrestre, detto Costante Solare, è di circa 1367 W/m^2 , ma solo una parte raggiunge il suolo, mediamente 1000 W/m^2 .

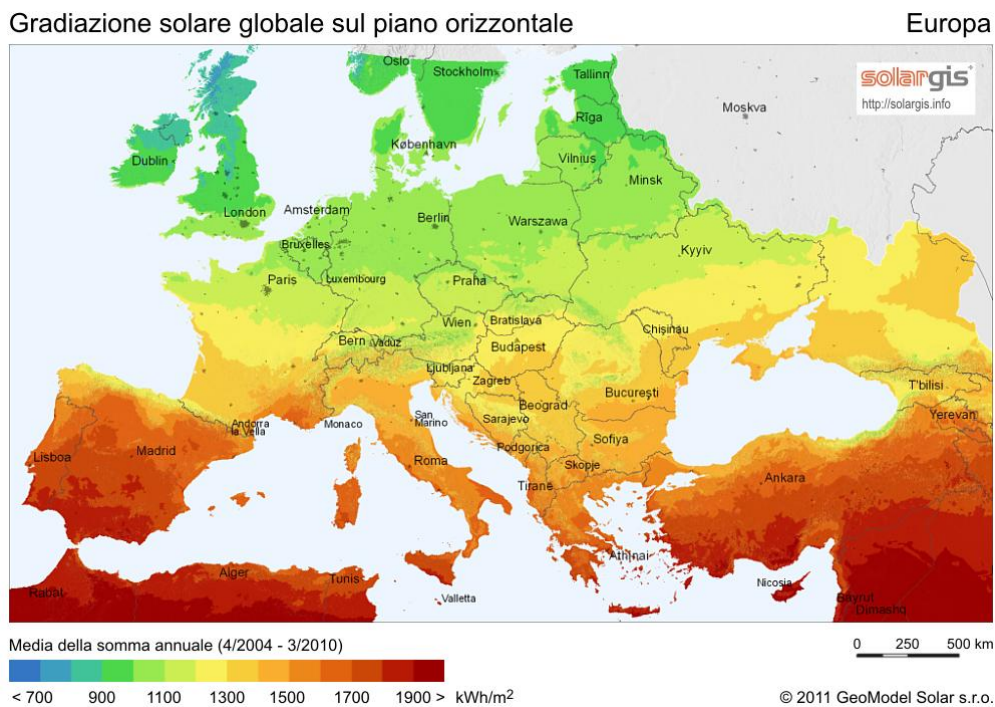


Figura 2 Gradazione solare europea su piano orizzontale

Capitolo 2

Elementi di Fisica

2.1 Effetto Fotovoltaico

La materia è costituita da atomi: ogni atomo è formato da un nucleo centrale e dagli elettroni che gravitano attorno ad esso negli orbitali. In ogni orbitale giacciono uno o più elettroni aventi lo stesso livello energetico e vengono attratti al nucleo tanto più forte quanto più sono vicini. In un cristallo, come in un semiconduttore, gli elettroni formano una serie di bande energetiche caratterizzate da diversi livelli energetici: la banda di conduzione, la banda proibita, e quella di valenza. Quella con il più alto livello energetico è la banda di conduzione, e la differenza energetica da questa banda a quella inferiore, la banda di valenza, viene detto gap energetico o bandgap (E_g) rappresentante la quantità di energia che serve ad un elettrone per liberarsi dall'atomo. Questo gap energetico è tanto più piccolo quanto più buone sono le doti di conduttore del materiale preso in considerazione: nei conduttori risulta essere $<0,1\text{eV}$, nei semiconduttori $0,1\text{eV} < E_g < 3\text{eV}$ e negli isolanti $>3\text{eV}$.

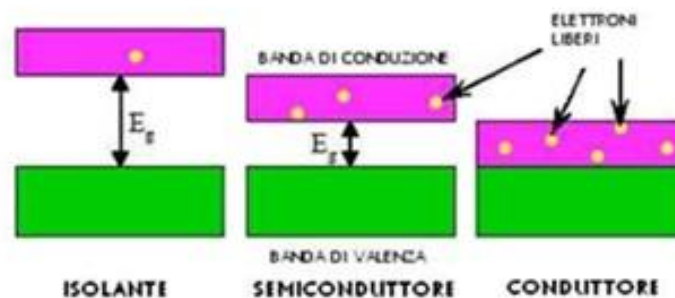


Figura 3 Livelli di bandgap tra isolanti, semiconduttori e conduttori

Essendo il bandgap in un semiconduttore relativamente basso (ad esempio per il silicio non drogato si ha $E_g = 1,12\text{eV}$), tramite l'assorbimento della radiazione solare (i fotoni che incidono il materiale) si può dare inizio al salto degli elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione. Questi elettroni che saltano nella banda di conduzione creano così una coppia elettrone-lacuna dando luogo alla corrente utilizzabile in uscita da un pannello. Buona parte dell'energia del fotone incidente viene però persa sotto forma di calore durante il processo di assorbimento e non può essere convertita in energia utile.

Quando si forma una giunzione tra due strati drogati di silicio si modificano bande e livelli di energia: le cariche minoritarie si diffondono oltre la giunzione come un gas a causa della differenza di concentrazione creando attorno alla giunzione un doppio strato di cariche fisse di segno opposto, al quale è associato un campo elettrico che favorisce il flusso di cariche minoritarie verso la zona in cui sono maggioritarie.

Ci sono diversi tipi di giunzioni:

- Omogiunzione p-n: formata da un semiconduttore drogato con atomi accettori a cui si pone a contatto un altro semiconduttore (uguale) drogato con atomi donori;
- Eterogiunzione p-n: si realizza mettendo a contatto due semiconduttori differenti;
- Barriera Schottky: si forma accostando un semiconduttore ad un metallo;
- p-i-n e n-i-p: si pone nel mezzo delle due regioni drogate p ed n uno strato intrinseco.

2.2 Cella Solare

Una cella solare è un dispositivo caratterizzato da una o più giunzioni p-n in grado di realizzare al suo interno i processi necessari alla produzione di energia elettrica, suddivisi in: assorbimento della radiazione solare, generazione e trasporto delle cariche elettriche, separazione dei portatori di carica di segno opposto e raccolta delle cariche tramite i contatti elettrici. Infatti la giunzione p-n crea un campo elettrico interno in grado di separare le cariche elettriche generate dall'effetto fotovoltaico. Quando un fotone con energia sufficiente incide sulla cella si viene a creare una coppia elettrone-lacuna che il campo elettrico spingerà verso il materiale a cui corrisponde lo stato di energia più basso: gli elettroni procederanno verso il semiconduttore di tipo n e le lacune procederanno verso il semiconduttore di tipo p. Il flusso di cariche così generato si tramuta in energia elettrica quando il dispositivo viene connesso ai conduttori in un circuito chiuso.

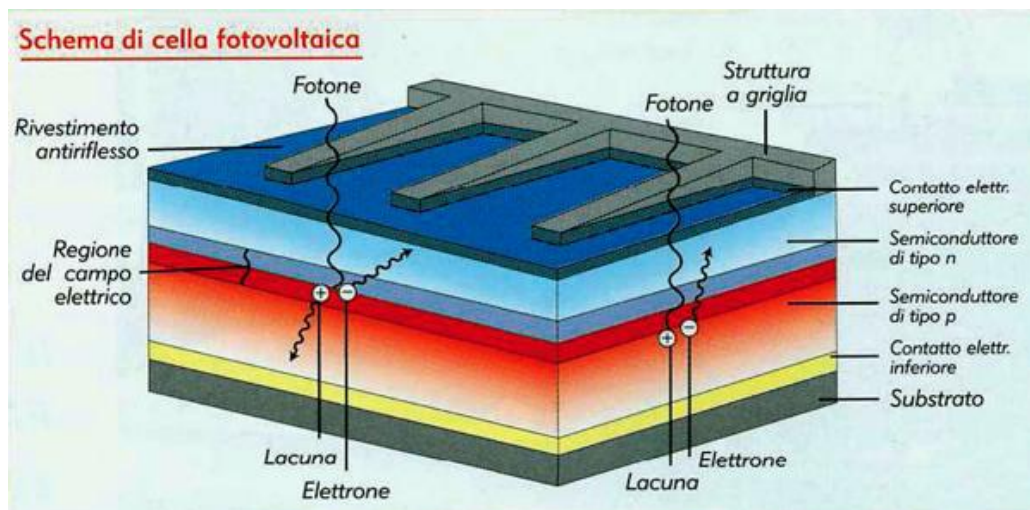


Figura 4 Schema semplificato cella fotovoltaica

Per quanto riguarda lo schema elettrico di una cella fotovoltaica, idealmente può essere rappresentata da un diodo in parallelo ad un generatore di corrente, ma nella realtà presenta anche delle resistenze che provocano una diminuzione del rendimento: una in parallelo al diodo chiamata resistenza parassita e l'altra in serie al blocco parallelo diodo/generatore/resistenza parassita definita resistenza di shunt.

In questo schema elettrico abbiamo il generatore di corrente che equivale alla corrente generata dall'effetto fotovoltaico, il diodo che tiene conto delle perdite di corrente dovute alla ricombinazione interna alla cella, la resistenza parassita che considera la resistenza dei due strati di silicio e dei contatti metallici e infine la resistenza di shunt che raccoglie tutte le perdite dovute alle dispersioni all'interno della cella [3].

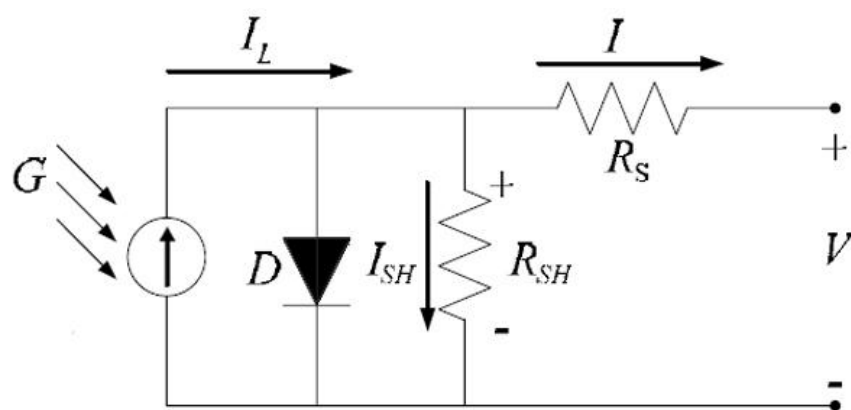


Figura 5 Schema elettrico cella solare

Per il calcolo dell'efficienza di conversione di una cella solare ci sono varie grandezze elettriche che entrano in gioco: la V_{oc} rappresenta la tensione di circuito aperto; I_{sc} la corrente di corto circuito; V_{MPP} la tensione nel punto di massima potenza; I_{MPP} la corrente nel punto di massima potenza ed infine la P_{In} che equivale alla potenza della radiazione solare incidente.

Il primo parametro che fornisce un valore indicativo sull'efficienza di una cella solare è il Fill Factor (FF) o fattore di riempimento della cella. Questo valore rappresenta il rapporto tra la massima potenza effettivamente estraibile e la massima potenza idealmente ottenibile. Il suo valore si ottiene mediante questa formula:

$$FF = (V_{MPP} \cdot I_{MPP}) / (V_{oc} \cdot I_{sc})$$

Il parametro da tenere in seria considerazione nella descrizione di una cella solare è sicuramente il rendimento di conversione (η). Questo viene definito come il rapporto tra la massima potenza elettrica generabile dalla cella e la potenza della radiazione solare incidente sulla cella stessa e si calcola come:

$$\eta = (V_{MPP} \cdot I_{MPP}) / P_{In}$$

Ci sono varie cause che possono inficiare il rendimento di una cella solare. La prima è data dalla riflessione, fenomeno che si manifesta quando non tutti i fotoni che incidono sulla cella penetrano al suo interno visto che in parte vengono riflessi dalla superficie della cella e dalla struttura che la ingloba ed in parte impattano sulla griglia metallica dei contatti. Inoltre ci possono essere fotoni troppo o troppo poco energetici: per rompere il legame tra elettrone e nucleo è necessaria una certa energia, e non tutti i fotoni incidenti riescono a fornirla. D'altra parte alcuni fotoni troppo energetici, pur riuscendo a liberare un elettrone dal nucleo, dissipano l'eccesso della loro energia in calore non utilizzabile. Anche il fenomeno della ricombinazione comporta un calo del rendimento visto che non tutti gli elettroni liberi vengono raccolti dal campo elettrico di giunzione ed inviati al carico esterno, dato che nel percorso dal punto di generazione verso la giunzione possono incontrare cariche di segno opposto e quindi ricombinarsi. Ci sono poi le resistenze parassite, elementi inevitabili all'interno della struttura della cella che provocano una dissipazione dell'energia in calore. Infine la lunghezza d'onda della radiazione solare: le celle fotovoltaiche non sono sensibili in ugual misura alle lunghezze d'onda e soprattutto non necessariamente sono sensibili a tutto lo spettro solare.

Capitolo 3

Tipologie di Pannelli Fotovoltaici

Nella produzione di moduli fotovoltaici si può optare per diverse tipologie di celle, a seconda del materiale usato, degli obiettivi di costo che bisogna perseguire e delle efficienze che si vuole raggiungere. Analizziamo tutte le principali tipologie costruttive dei pannelli fotovoltaici evidenziandone tecniche costruttive, vantaggi e svantaggi.

3.1 Silicio Monocristallino

Il silicio monocristallino è la tipologia più diffusa e viene ottenuto attraverso un metodo di produzione chiamato processo Czochralski: questo processo consiste nel sollevamento verticale a bassissima velocità di un seme di silicio monocristallino immerso inizialmente per alcuni millimetri in un colatoio contenente silicio puro fuso. La temperatura del silicio viene mantenuta al di sopra della temperatura di fusione (1414 °C) cosicché aderisce al seme monocristallino acquisendone la struttura molecolare regolare. Il seme monocristallino viene lentamente estratto permettendo al silicio depositato di solidificarsi nella forma di un lingotto cilindrico. Successivamente, il lingotto viene tagliato con speciali seghe a filo in fettine (wafer) molto fragili. Su questo wafer, dopo aver effettuato un bagno chimico per rimuovere l'ossidazione protettiva, viene eseguito il drogaggio attraverso la tecnica della diffusione o dell'impiantazione ionica per creare la giunzione p-n, drogando un piccolo strato del wafer con drogante opposto (tipo n mediante fosforo se il wafer era di tipo p). Infine si deposita una pasta metallica sulla cella per creare i contatti adibiti alla raccolta delle cariche elettriche e alla loro convergenza verso i conduttori. Per ottimizzare le prestazioni e ridurre i costi di un singolo pannello solare, dai wafer cilindrici viene eliminato un pezzo dai loro bordi quadrati.

Fino all'avvento del fotovoltaico a concentrazione, il modulo monocristallino era quello con l'efficienza maggiore, dal 12% al 20%, e che richiedeva meno spazio per produrre una potenza di 1 Kw_p (ha bisogno di 6 metri quadrati). Il modulo ha una durata elevata, mediamente si attesta sui 25 anni e presenta scarse perdite di rendimento. Per quanto riguarda gli svantaggi, il modulo realizzato in silicio monocristallino è piuttosto costoso anche a causa del suo processo produttivo che comporta uno certo spreco di silicio. Inoltre è abbastanza sensibile agli ombreggiamenti e all'aumentare della temperatura si verifica un calo non indifferente dell'efficienza.

3.2 Silicio Policristallino

Il policristallino è un modulo costituito da vari cristalli di silicio monocristallino orientati in modo casuale. Si realizza riciclando componenti elettronici scartati rifondendoli assieme per ottenere una composizione compatta. Il metodo utilizzato per fondere assieme i vari cristalli di silicio viene nominato casting: il materiale di scarto viene frantumato e sottoposto ad una operazione di decapaggio, consistente in una purificazione del materiale da residui di ruggine e scaglie di laminazione. Successivamente viene fuso e colato nelle forme apposite (da cui deriva il termine

casting) in cui viene lasciato ricristallizzarsi; durante questa fase è possibile introdurre un drogante nel semiconduttore. Il processo di fusione e cristallizzazione sono critici per quanto concerne il tasso di impurità presenti nel materiale: per questo motivo è difficile produrre quantitativi elevati di blocchi di silicio policristallino in tempi ragionevoli. Dopo la cristallizzazione si procede al taglio del blocco in lingotti da cui si ricavano i wafer che vengono ossidati per protezione. Dal wafer si eseguono le stesse operazioni del modulo monocristallino per la realizzazione della cella.

I vantaggi di questa tipologia consistono sicuramente nel costo minore di produzione rispetto alla controparte monocristallina: infatti il processo usato è più semplice e comporta un minor spreco di silicio. Anch'essi, come i monocristallini hanno un'elevata durata media (25 anni) e presentano una buona tolleranza al calore, permettendoli di operare a temperature più elevate senza eccessive perdite in efficienza.

Di contro, siccome si utilizza silicio meno puro e i bordi dei vari cristalli potrebbero impedire il flusso di elettroni, le celle di silicio policristallino sono meno efficienti (10%-16%) e quindi necessitano di una superficie più ampia per produrre lo stesso quantitativo di energia dei moduli monocristallini.

3.3 Silicio Amorfo

La struttura amorfa (a-Si) è una delle forme allotropiche del silicio (è la proprietà di esistere in diverse forme) caratterizzata da una struttura molecolare irregolare. Se nel silicio cristallino la struttura si ripete fino a formare un reticolo ordinato, in quello amorfo, invece, questo ordine non è presente e gli atomi formano un reticolo disordinato: non tutti possiedono legami con altri quattro atomi di silicio. Alcuni atomi, dunque, hanno dei legami disponibili che costituiscono dei difetti nell'ordine del reticolo e sono responsabili del suo comportamento elettrico.

Nel caso del silicio amorfo è improprio parlare di celle fotovoltaiche: il silicio infatti viene depositato uniformemente e in piccolissime quantità su superfici plastiche o vetrate, formando un unico film sottile dello spessore di qualche millesimo di millimetro. I pannelli in silicio amorfo hanno una colorazione omogenea, di solito nera o comunque scura, sono dotati di buona flessibilità e leggerezza e lo spessore complessivo del modulo, telaio compreso, è di pochi millimetri. Tutte queste caratteristiche fanno del silicio amorfo la tecnologia ideale per applicazioni architettoniche avanzate, in cui è fondamentale ricercare la massima resa estetica e pesi contenuti anziché puntare unicamente sulla producibilità dell'impianto. Oltre ai vantaggi della leggerezza e flessibilità, il silicio amorfo presenta un costo dei moduli di molto inferiore (anche del 30-40%) rispetto alle tecnologie in silicio cristallino. Inoltre, quando la radiazione solare incidente sui pannelli non è ottimale (nuvolosità, ombreggiature, ecc.), il silicio amorfo assicura una migliore resa energetica rispetto al silicio cristallino.

Tuttavia il basso costo è giustificato dalla minore resa produttiva, dal 6% al 10%, che costringe l'utilizzo di ampie superfici per l'installazione a causa della loro bassa densità energetica. Inoltre, pur avendo un'elevata durata di vita (anche per loro si raggiungono i 25 anni medi), dopo alcuni mesi dall'installazione, i moduli subiscono un brusco calo di efficienza, pari circa al 20%, il quale porta il rendimento della potenza nominale a sfiorare l'80% per quasi tutta la vita produttiva dell'impianto. [4]

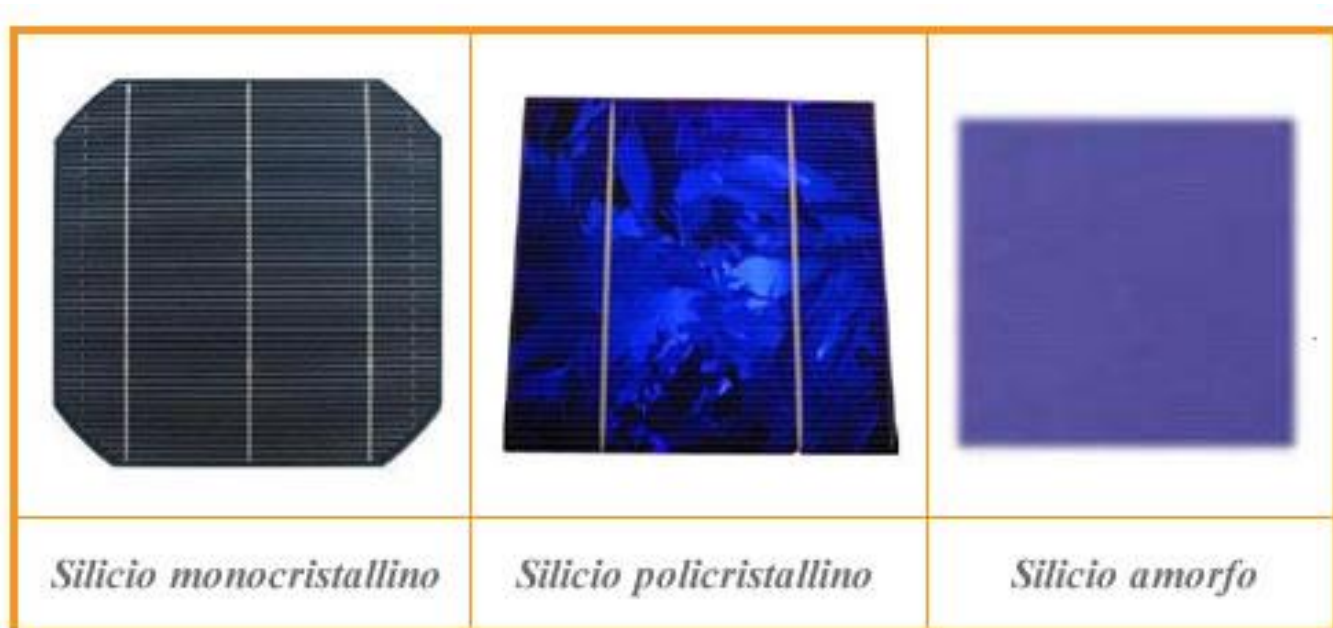


Figura 6 Aspetti delle varie celle in silicio

3.4 A Film Sottile

Il silicio amorfo può essere usato nella realizzazione di pannelli a film sottile (thin-film), una tipologia di pannello fotovoltaico realizzata mediante la deposizione di molteplici strati sottili di spessore compreso tra il micrometro e la decina di nanometri su un substrato plastico, di vetro o metallico. Questi strati molteplici di materiale costituiscono giunzioni singole, doppie o multiple che danno origine all'effetto fotovoltaico. Le celle vengono ricavate dagli strati precedentemente realizzati mediante l'utilizzo di appositi laser. Il substrato è non rigido per consentire la realizzazione di lunghe lamine poco pesanti che possano essere arrotolate e facilmente installate. Le varie tipologie di applicazioni a film sottile in commercio si differenziano in base al materiale utilizzato nella realizzazione della giunzione:

- Silicio Amorfo;
- Tellururo di Cadmio (CdTe);
- Rame Indio Gallio di Selenio (CIGS);
- Organiche (composti organici del carbonio);

Per la realizzazione di queste tipologie di celle si usa principalmente la tecnica della deposizione chimica da vapore (Chemical Vapor Deposition: CVD) in cui un supporto, precedentemente adattato con laser o bagni chimici, viene utilizzato come base su cui depositare un precursore molecolare (una sostanza che attraverso una reazione chimica diventa parte integrante di una nuova molecola) mediante l'utilizzo di un gas di trasporto. In questo modo si genera una reazione o una decomposizione tra il supporto e il precursore per cui si ottiene uno strato del materiale desiderato e si procede fino alla realizzazione della giunzione singola, doppia o multipla. Il gas di trasporto altamente inquinante viene ogni volta estratto assieme agli scarti del processo. Mediante l'utilizzo

di laser si provvede poi a rimuovere le impurità dai bordi del modulo e ad ultimare la circuiteria disegnando le celle. E' inoltre possibile realizzare strati ad alta densità ricoprendo anche forme geometriche complesse col materiale desiderato in tempi relativamente rapidi. Analizziamo nel dettaglio le varie tipologie di celle a film sottile.

Il Tellururo di Cadmio (CdTe) è un composto chimico cristallino formato dal Tellurio e dal Cadmio con caratteristiche simili al silicio o all'arseniuro di gallio. Grazie alle sue proprietà di semiconduttore di tipo p è facile realizzare una eterogiunzione p-n (giunzione tra materiali aventi gap energetici diversi) accostandolo al Solfuro di Cadmio (CdS).

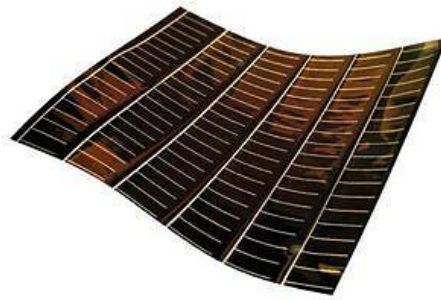


Figura 7 Film sottile realizzato con il Tellururo di Cadmio

I principali vantaggi di questa applicazione derivano dai bassi costi, sia a livello di materiale sia di produzione, rispetto al silicio amorfo, una elevata semplicità di riciclaggio quasi del 95% dell'intero materiale, un maggiore assorbimento dell'energia luminosa e di conseguenza una resa più elevata rispetto al silicio amorfo in condizioni di luminosità diffusa o diretta (si può arrivare ad un picco massimo di efficienza pari al 16%) e un fattore molto importante come la maggiore stabilità nel tempo rispetto al silicio amorfo.

Purtroppo però non è esente da svantaggi visto che a temperatura ambiente il semiconduttore è sì stabile ma, in particolari condizioni lavorative, emana esalazioni tossiche. Per ovviare a questo problema viene incapsulato in lastre tipicamente di vetro in grado di resistere anche in situazioni di incendio.

Per quanto riguarda la tecnologia basata sul Rame Indio Gallio di Selenio (CIGS), si tratta di una tipologia già studiata a partire dagli anni '50 ma il cui sviluppo vero e proprio risale solo ad una ventina di anni fa. E' formata da una struttura di base caratterizzata da un substrato di vetro su cui viene realizzata una eterogiunzione formata da CIGS come semiconduttore intrinseco di tipo p e un semiconduttore di tipo n quale l'Ossido di Zinco (ZnO) drogato con Alluminio. Il più delle volte si applica un sottile strato neutro per separare le due regioni aumentando così l'efficienza e la robustezza della giunzione.

Tra i suoi vantaggi si hanno una buona efficienza (tra il 13% e il 19%, la migliore tra le tipologie a film sottile) e soprattutto una garanzia di durata media di vita che si attesta sui 25 anni in quanto non ci sono processi intrinseci che potrebbero causare drastiche riduzioni delle prestazioni nel tempo.

Purtroppo anche questa tecnologia è afflitta dal problema della tossicità di esalazioni emanate in alcune condizioni di lavoro, ma in quantità nettamente inferiore al Tellururo di Cadmio.



Figura 8 Film sottile realizzato con Rame Indio Gallio di Selenio

La tecnologia alla base delle celle fotovoltaiche organiche è di recente concezione e si caratterizza da una parte fotoattiva basata sui composti organici del carbonio. Tutte le tipologie di celle fotoattive hanno una struttura comune composta da un substrato di vetro o plastica facente da supporto a strati sottili contenenti i materiali fotoattivi che vengono frapposti tra due elettrodi conduttivi.

Per la realizzazione di celle organiche il più efficienti possibili ci si basa sul processo della fotosintesi clorofilliana utilizzando materiali in cui un pigmento assorbe la radiazione solare mentre altri estraggono la carica. Per tale scopo i pigmenti principali usati sono i polimeri, le small molecules (molecole sintetizzate per ottenere il massimo assorbimento dello spettro solare) e le antocianine derivate dai frutti di bosco. Si possono suddividere le celle organiche in due sottocategorie:

- Organiche in cui la parte attiva è totalmente organica o polimerica, caratterizzate da bassissime efficienze (4%-5% massimo) e da una breve durata di vita (un paio d'anni) ma aventi processo produttivo semplice e molto economico;
- Ibride, le più diffuse, in cui il materiale organico viene mescolato e unito con un materiale inorganico capace di una buona conduzione di elettroni formando in questo modo una eterogiunzione fotoattiva, dove il materiale organico funge da fornitore di cariche mentre l'inorganico ne agevola la trasmissione sino agli elettrodi.

Il notevole vantaggio dei materiali fotovoltaici organici che ne ha permesso la rapida diffusione consiste nel fatto che essi possono essere depositati su larghe aree o su pellicole in soluzione liquida mediante processi tipici dell'industria della stampa quali l'inkjet printing e lo screen printing (simile alla serigrafia): processi additivi in cui gli scarti di materiale sono notevolmente esigui e dal basso costo. Inoltre, a contrario di molte applicazioni a film sottile, non è richiesta la presenza di strati contenitivi visto che non c'è il rischio di esalazioni tossiche. Purtroppo nemmeno le celle organiche sono esenti da difetti, visto che presentano un limitato assorbimento dello spettro solare, una sensibilità delle prestazioni maggiore al variare della temperatura e una durata utile delle celle di soli 2-3 anni.

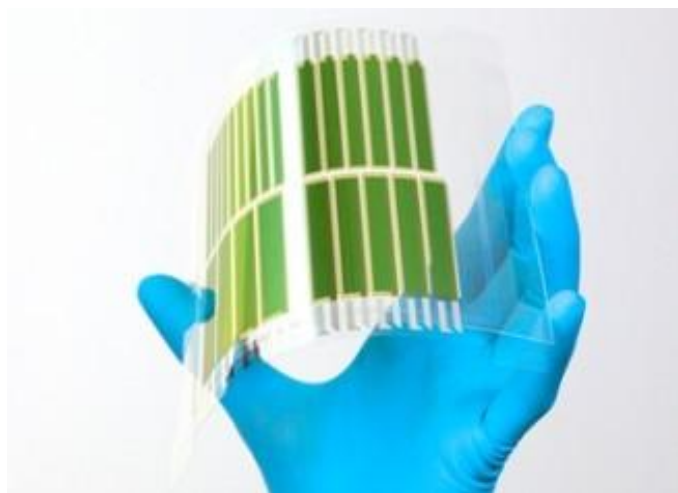


Figura 9 Cella organica ibrida

Ricapitolando, i vantaggi nell'utilizzo delle celle a thin-film consistono innanzitutto nei processi di fabbricazione semplici, totalmente automatizzati e facilmente adattabili a nuove innovazioni. Questo, unito al fatto che tale processo richiede solo piccole quantità di silicio, comporta un basso costo rispetto alle controparti in silicio mono e policristallino. Inoltre con questa tipologia si possono realizzare circuiterie a struttura monolitica integrata non essendo necessario l'assemblaggio di ogni singola cella, si possono creare moduli leggeri e altamente flessibili (la loro resistenza e flessibilità dipendono dalla superficie a cui sono collegati) di facile installazione anche in superfici curve e, cosa non da poco, offrono prestazioni migliori in condizioni di luce peggiori reagendo al meglio in casi di copertura parziale, come sotto ombra, sporcizia e neve rispetto ai pannelli cristallini.

Purtroppo però le applicazioni a film sottile raggiungono mediamente un rendimento decisamente inferiore rispetto agli altri pannelli: si vai dal 4% delle celle organiche fino al 19% raggiunto dalle celle CIGS con conseguente bisogno di ampi spazi per raggiungere potenze accettabili. Nonostante il mercato sia ancora dominato dalla tecnologia basata sul silicio cristallino, le tecnologie thin-film stanno trovando sempre maggiori applicazioni specialmente in ambito architettonico grazie alla loro semplicità di installazione e produzione, al minor impatto visivo fornito e al leggero peso che ne consente l'applicazione estensiva su tetti [5].

3.5 A Multigiunzione

Negli ultimi anni si è sviluppata sempre più una nuova tipologia di cella solare: la cella multigiunzione. Se agli inizi veniva usata solo in pochissimi ambiti quali applicazioni spaziali, ora si sta sempre più espandendo diventando il fulcro degli impianti fotovoltaici a concentrazione. A differenza delle altre celle non viene utilizzato il silicio ma si preferiscono composti formati da elementi semiconduttori appartenenti al III-V gruppo della tavola periodica come l'Arseniuro di Gallio (GaAs), Fosfuro di Indio (InP) e l'Antimoniuro di Gallio (GaSb). Questi composti semiconduttori hanno molteplici punti di forza rispetto al silicio godendo di una più alta saturazione di velocità degli elettroni, una maggiore mobilità degli elettroni e soffrendo di un minor rumore termico. Grazie a queste caratteristiche una cella a multigiunzione riesce a garantire strati di materiali più sottili per ottenere l'effetto fotovoltaico, una migliore conversione della radiazione dello spettro solare in energia elettrica (l'efficienza può variare dal 25% fino ad oltre il 50%) e di conseguenza un notevole risparmio nello spazio occupato ed infine una maggiore tolleranza alle alte

temperature abbinata ad una minor degradazione che comportano un aumento della robustezza e della durata della cella.

Il principale svantaggio di questa tipologia di cella nonché il motivo principale per cui questi composti semiconduttori non hanno ancora soppiantato il silicio risiede nel fatto che il processo produttivo di tale celle risulta molto complesso e inoltre i composti semiconduttori sono molto più rari del comune silicio. Per questi motivi, i costi di una cella multigiunzione arrivano a superare anche di 3-5 volte il costo di un'ottima cella in silicio monocristallino, costo che però è sempre più in diminuzione. In seguito analizzeremo il processo produttivo alla base di una cella multigiunzione e le varie tipologie costruttive.

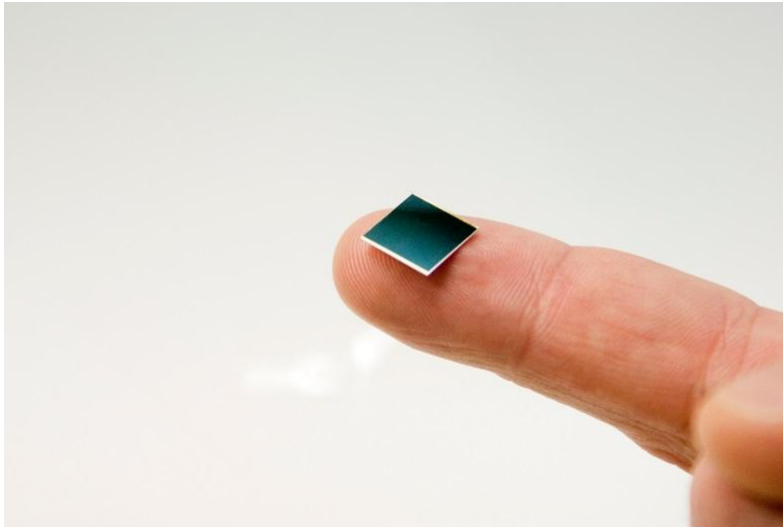


Figura 10 Cella a multigiunzione

Capitolo 4

Fotovoltaico a Concentrazione

4.1 L'impianto Fotovoltaico a Concentrazione

L'impianto fotovoltaico a concentrazione è composto da varie componenti che, se efficacemente assemblate e tarate, permettono all'intero impianto di raggiungere alti valori di rendimento e quindi una notevole produzione di energia elettrica a parità di spazio occupato. Troviamo infatti il ricevitore solare, composta dal modulo fotovoltaico e dal sistema di dissipazione, il concentratore solare, il sistema di tracking e l'inverter.

Lo scopo degli impianti a concentrazione è quello di sostituire quanto più possibile i materiali ad alta qualità e affidabilità necessari alla produzione delle costose celle solari con sempre più vantaggiose ed economiche ottiche solari (necessarie al concentramento dei fasci luminosi verso la cella) e strutture meccaniche di supporto e di tracking.

Sono due le principali tipologie di sistemi a concentrazione solare:

- Sistemi Point-Focus: l'ottica di concentramento presenta tanti fuochi quante sono le celle costituenti il modulo.
- Sistemi Dense-Array: dotate di un unico fuoco per concentrare il raggio luminoso su tante celle ravvicinate tra loro.



Figura 11 Impianto fotovoltaico di tipo Dense-Array

Inoltre si possono identificare diverse tipologie di impianto a seconda del fattore di concentrazione:

- Sistemi a bassa concentrazione LCPV (Low Concentrator Photovoltaics) che concentrano il fascio luminoso fino a 200 soli (in cui si privilegia l'uso di celle in silicio ad alta efficienza);
- Sistemi ad alta concentrazione HCPV (High Concentrator Photovoltaics) aventi fattore di concentrazione maggiore di 300 soli (vengono preferite le celle a multigiunzione).

Analizziamo nel dettaglio ogni singolo componente facente parte di un impianto fotovoltaico a concentrazione evidenziandone le sue peculiarità e l'importanza assunta all'interno dell'apparato.

4.1.1 Ricevitore Solare: Cella e Sistema di Dissipazione

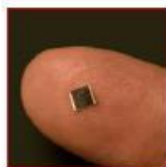
Il ricevitore solare è l'elemento cardine degli impianti fotovoltaici: costituito dalle celle solari (con relativo sistema di connessione) e dal sistema di dissipazione è il punto focale dei raggi luminosi concentrati. Per questo motivo deve essere realizzato in modo tale da lasciar passare il maggior quantitativo di luce possibile, contenere le perdite dovute alla dissipazione di calore e allo stesso tempo deve essere in grado di proteggere la cella solare dai fenomeni atmosferici. Infatti la cella solare è l'elemento più delicato e sensibile dell'impianto: è lei la responsabile della produzione di energia elettrica mediante l'effetto fotoelettrico. Per questo motivo, la scelta della tipologia di cella, delle sue dimensioni e dei materiali di cui è costituita incidono pesantemente nei due fattori principali di un impianto fotovoltaico: l'efficienza e il costo.

Se nei primi esemplari di impianti a concentrazione si è preferito optare per una classica cella monogiunzione in silicio (la più diffusa e con un buon rapporto efficienza/costo), successivamente ci si è resi conto che le celle in silicio non sono adatte a sfruttare appieno i vantaggi derivanti dalla concentrazione solare. Infatti, negli impianti ad alta ed altissima concentrazione, l'energia solare convogliata al ricevitore è talmente alta che le temperature raggiunte dalla cella solare aumentano a dismisura causando un'inesorabile degrado delle prestazioni della cella stessa, visto che quelle composte in silicio hanno un'efficienza che diminuisce del 0,5% per ogni grado °C in più [6].

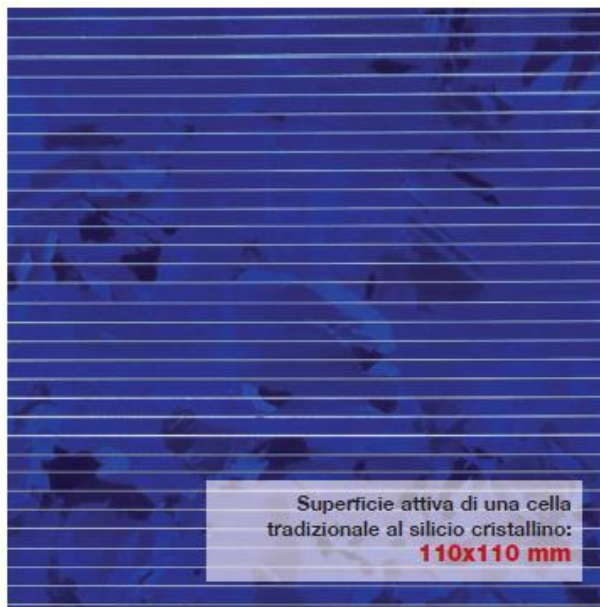
Per questi motivi, il silicio non è molto nella produzione di celle solari per impianti a concentrazione (si può trovare solo nei sistemi LCPV) e si è passati all'utilizzo delle celle a multigiunzione. Queste celle, seppur più costose e dal processo produttivo più complicato, hanno numerosi vantaggi che ben si sposano con le specifiche richieste dagli impianti a concentrazione: alta efficienza (attualmente il massimo teorico arriva a 58%), degrado delle prestazioni con l'aumentare della temperatura inferiore alle celle in silicio (0,25% per grado °C contro lo 0,5%) e minore dimensione delle cella (3x3mm di area attiva contro i 110x110mm di quella in silicio). [7]

**Il doppio di energia con meno
dello 0,1% di superficie attiva**

Comparazione dimensionale, a parità di produzione energetica, fra una cella in silicio policristallino e una cella a tripla giunzione installata su un sistema con un fattore di concentrazione pari a 500.



Superficie attiva
di una cella a tripla giunzione:
3x3 mm



Superficie attiva di una cella
tradizionale al silicio cristallino:
110x110 mm

Figura 12 Dimensioni a confronto tra cella multigiunzione e cella monogiunzione in silicio

Analizzeremo in seguito più nel dettaglio le caratteristiche e le tipologie costruttive delle celle a multigiunzione.

Per operare alla massima produttività, le celle solari devono lavorare in un range ben delimitato di temperature: superare tali soglie comporterebbe il verificarsi di conseguenze negative come il degrado a breve termine (perdita di efficienza) e a lungo termine (danni irreversibili alla cella). Per questi motivi è di vitale importanza per la cella progettare un adeguato sistema di raffreddamento che assicuri i seguenti vincoli: mantenimento delle temperature a livello basso e il più possibile uniforme, affidabilità del sistema, sufficiente margine nel caso si verificasse un funzionamento nel caso peggiore e il minor consumo di potenza dell'apparato.

Come già detto, l'efficienza della cella diminuisce all'aumentare della temperatura ed inoltre l'operatività prolungata da parte della cella ad alte temperature può causare degradi permanenti nella struttura della cella. Per questo, ogni produttore di celle fotovoltaiche specifica il coefficiente di degrado termico e la massima temperatura di lavoro della cella.

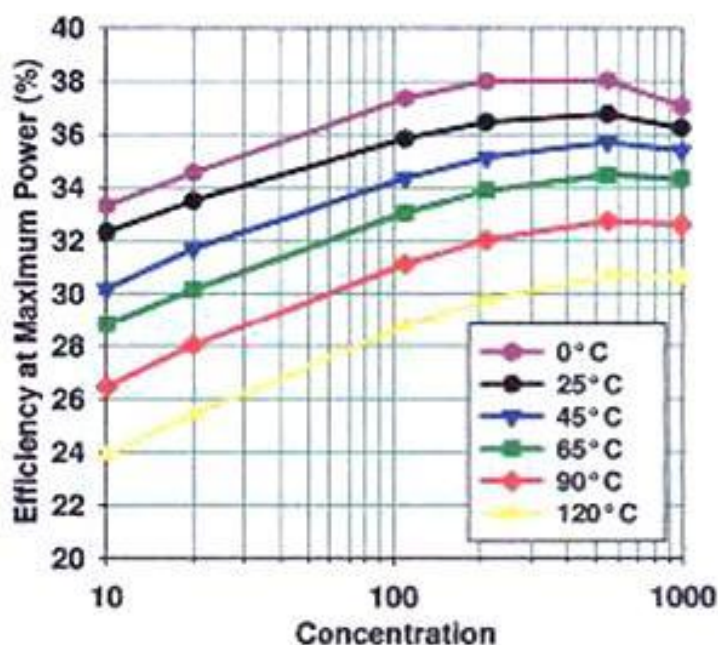


Figura 13 Efficienza in funzione della concentrazione al variare della temperatura

A seconda di come sono disposte le celle, si sceglie il metodo di dissipazione più congeniale: per la combinazione di singole celle è sufficiente un sistema di dissipazione passivo anche per alti livelli di concentrazione, mentre per celle densamente distribuite occorre utilizzare, quando poste sotto a medie-alte concentrazioni (> 150 soli), sistemi di dissipazione attivi aventi bassa resistenza termica ($< 10^{-4} \text{Km}^2/\text{W}$).

Analizziamo i requisiti che un buon sistema di dissipazione deve raggiungere. All'interno del modulo fotovoltaico presente nel ricevitore solare vi si trovano celle connesse elettricamente in serie e diverse di queste connessioni possono venire collegate in parallelo. Come sappiamo le connessioni in serie aumentano la tensione d'uscita ma diminuiscono la corrente a parità di potenza fornita, facendo così decrescere le perdite ohmiche. Però la cella che fornisce il più piccolo contributo in uscita limita fortemente la totale corrente della serie. E siccome l'efficienza cala all'aumentare della temperatura, la cella avente la temperatura più elevata limita l'efficienza dell'intera stringa di serie. Questo fenomeno può essere evitato mantenendo uniforme la

temperatura tra le varie celle e quindi la forma e dimensione del sistema di dissipazione deve essere in grado di raffreddare tutte le celle allo stesso modo.

Bisogna sempre cercare di realizzare un impianto dalla maggior resa produttiva abbinata al minor costo raggiungibile: quindi è meglio usare un sistema di raffreddamento il più semplice possibile (e costituito da materiali affidabili ed economicamente più vantaggiosi) e dai costi di manutenzioni minimi, riducendo ingombro e peso, con un occhio ovviamente alla salute e all'inquinamento ambientale, cercando quindi di ridurre al minimo le sostanze potenzialmente tossiche.

L'affidabilità del sistema di dissipazione è di vitale importanza visto che un suo ipotetico guasto provocherebbe elevate perdite nella produttività e danni permanenti alle celle solari. Inoltre l'apparato di raffreddamento deve essere progettato per gestire l'ipotesi di funzionamento nel caso peggiore come interruzioni di corrente, guasti elettrici all'interno dei moduli fotovoltaici e anomalie di tracciamento.

Ovviamente un buon sistema di dissipazione deve consumare meno potenza utile possibile. Se per il loro funzionamento quelli passivi non richiedono energia, non si può dire lo stesso di quelli attivi, che quindi vanno progettati con l'obiettivo di consumare meno potenza possibile. A riguardo di ciò è possibile realizzare dissipatori che, con il calore estratto dal raffreddamento delle celle, mediante il trasporto di acqua (o altro liquido adeguato) alla più alta temperatura possibile verso uno scambiatore di calore secondario, portino un congruo aumento della totale efficienza di conversione (cercando di evitare il più possibile le perdite di calore nel percorso).

Nel caso di sistemi di dissipazione passivi, la soluzione più usata prevede di disporre delle alette lineari su tutta la superficie disponibile. Inoltre, per diminuire i costi del dissipatore, si può alloggiare la cella all'interno di una scatola di alluminio verniciato usando così il fondo di quest'ultima come ulteriore superficie dissipante. Nel caso di sistemi Point-Focus il costo del sistema di dissipazione aumenta all'aumentare della superficie delle lenti mentre rimane invariato con la concentrazione, a causa del fatto che all'incremento dell'area di riflessione corrisponde l'uso di un più spesso e costoso dissipatore. Aumentando invece il livello di concentrazione il design del sistema dissipante non cambia di molto ma è necessario raggiungere una bassa resistenza termica di contatto tra il substrato e il dissipatore al fine di mantenere bassa la temperatura della cella.

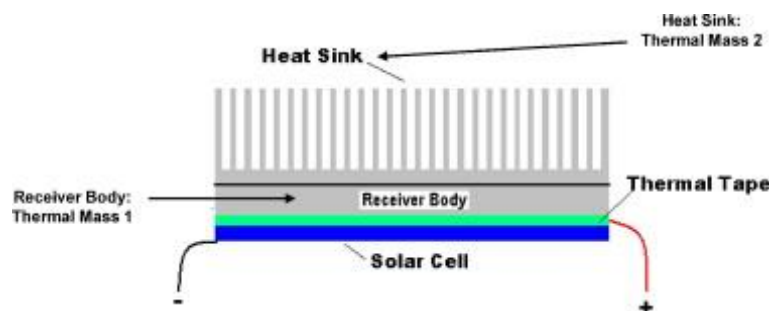


Figura 14 Sistema di dissipazione passivo

Per quanto riguarda i dissipatori attivi ci sono diverse tipologie di sistemi da poter utilizzare a seconda del tipo di impianto (e quindi della disposizione delle celle) e della quantità di calore da dissipare. Nel caso di sistemi Dense-Array sotto alta concentrazione, si può usare un circuito di raffreddamento ad acqua capace di estrarre 500 kW/m^2 dalla cella mantenendo le temperatura sui 40°C . Il principio di funzionamento si basa sullo scorrimento dell'acqua attraverso piccoli canali paralleli tra loro in contatto termico con le celle. Questo circuito di raffreddamento forma anche

parte della struttura di sostegno del ricevitore fotovoltaico ed è prodotto in modo modulare per facilitarne la manutenzione. [8]

4.1.2 Concentratore Solare

L'elemento che caratterizza un impianto CPV è sicuramente il concentratore solare. Sviluppato e testato a partire dalla fine degli anni '70, è a questo elemento che si deve la progressiva diminuzione dei costi degli impianti CPV e l'aumento dell'efficienza. Infatti il concentratore è un sistema ottico composto da lenti o specchi che permette di concentrare la luce del sole sulla cella fotovoltaica, permettendo così di ridurre l'area attiva della cella diminuendo in questo caso i costi.

Infatti, sfruttando il principio di concentrazione nei pannelli solari, si può produrre una pari quantità di energia tramite una superficie inferiore di celle fotovoltaiche.

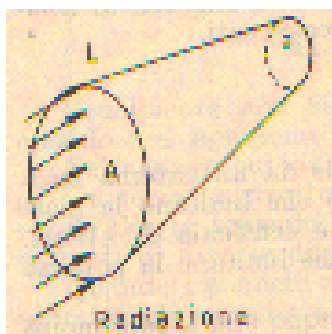


Figura 15 Principio di funzionamento concentratore solare

Questo principio afferma che se una superficie (A) viene colpita dalla radiazione solare si può convogliare le radiazioni verso una superficie più piccola (a) tramite un dispositivo (L), il concentratore solare, costituito solitamente da lenti o specchi (e in alcuni casi una combinazione dei due). L'energia elettrica ricavabile dalla cella fotovoltaica (a) è equivalente a quella della superficie più grande (A) in quanto le radiazioni vi giungono concentrate. Questo principio permette di ridurre la quantità delle celle solari e pertanto il costo del pannello solare. Il fattore di concentrazione, dato dal rapporto A/a viene solitamente espresso in “soli” anche se in realtà questa è una unità di misura di potenza: si assume che la luce diretta proveniente dal sole, nelle migliori condizioni atmosferiche possibili e per una superficie normale alla direzione dei raggi incidenti, sia caratterizzata da una potenza per unità di superficie di 1 sole 0.85kW/m^2 .

Lo scopo dell'ottica nei concentratori è quello di aumentare il flusso della radiazione solare sulla cella. Un sistema ottico è caratterizzato principalmente da tre parametri: fattore di concentrazione C, efficienza ottica η_{op} , angolo di accettazione θ_A .

Il fattore di concentrazione permette di conoscere l'intensità del fascio luminoso che inciderà sulla cella una volta esposta al sole.

L'efficienza ottica, invece, è un parametro utilizzato per la stima del rendimento del sistema e corrisponde al rapporto tra la potenza incidente e la potenza trasmessa alla parte sensibile del ricevitore.

L'angolo di accettazione è un parametro fondamentale per il concentratore. Le ottiche sono progettate in modo tale che i raggi raggiungano l'area attiva della cella; quando si ha un disallineamento del

sistema rispetto ai raggi solari è possibile che parte dei raggi vadano “fuori fuoco” causando un calo dell’efficienza del sistema. Questo stesso dato può essere espresso numericamente indicando l’angolo di deviazione entro il quale viene garantita una erogazione di potenza minima del 90% rispetto alla prestazione nominale: tale angolo viene detto angolo di accettazione.

I concentratori ottici si dividono principalmente in tre categorie:

- Ottiche di tipo diffrattivo (lenti prismatiche, lenti di Fresnel, filtri dicroici, ecc.), in cui la luce solare viene deviata e indirizzata sul ricevitore attraversando un mezzo diverso dall’aria (vetro, materiale plastico, ecc.) e può essere scomposta anche nelle sue componenti spettrali (sfruttando il principio della rifrazione);
- Ottiche di tipo riflessivo (specchi), in cui la luce solare viene deviata dalla sua direzione di incidenza e riflessa verso il sistema ricevitore senza essere scomposta nelle diverse componenti spettrali;
- Sistemi ibridi, composti da sistemi a rifrazione e riflessione;

Analizziamo nel dettaglio le varie tipologie di ottiche concentrative.

Nei concentratori di tipo diffrattivo l’ottica più usata è la Lente di Fresnel: viene ottenuta da una lente ordinaria, sezionata in anelli circolari, dal centro sull’asse ottico, mantenendo solo il bordo di ogni sezione concentrica. Il risultato è una lente con spessore di pochi millimetri (4-5 mm), caratterizzata da una simmetria ad anelli concentrici che convogliano la luce verso la cella solare. Tipicamente le lenti di Fresnel sono realizzate in plastica, possono raggiungere livelli di efficienza piuttosto alti ed essere accoppiate a fibre ottiche. Inoltre sono soggette al fenomeno dell’aberrazione cromatica, ovvero presentano diversi punti di focalizzazione a seconda della lunghezza d’onda.

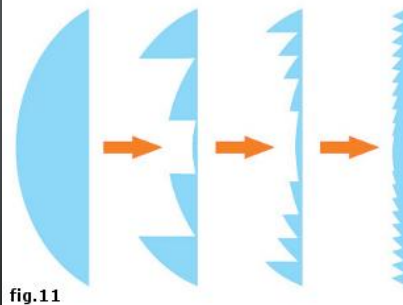
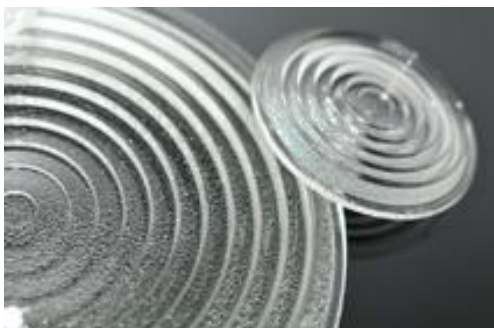


fig.11

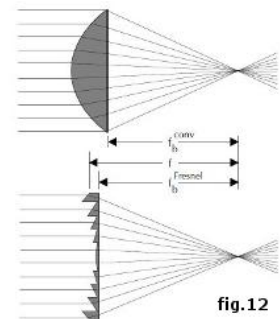


fig.12

Figura 16 Forma tipica lente di Fresnel

Figura 17 Struttura e funzionamento lente di Fresnel

Soprattutto nei sistemi Point-Focus l’ottica di focalizzazione è costituita da lenti di Fresnel, generalmente realizzate in materiale acrilico, con coefficiente di trasmissione tra l’80% e il 95%. In questo caso la radiazione solare viene concentrata in celle ben separate l’una dall’altra con dimensioni estremamente ridotte. Per ridurre la precisione di puntamento richiesta da questi sistemi, viene spesso adottata la soluzione di inserire sotto la lente principale un sistema ottico secondario, che consiste in genere in piccoli coni la cui superficie interna è riflettente. In alcuni dispositivi le lenti di Fresnel sono incorporate in strutture ottiche opportunamente progettate, in modo da formare le cosiddette lenti Fresnel dome-shaped, che consentono di ridurre i problemi di puntamento e contemporaneamente l’aberrazione cromatica.

In alternativa alla lente di Fresnel, si può usare una lente prismatica costituita da una serie di prismi affiancati che hanno la proprietà comune di deviare il fascio incidente sulla base (che compone la

superficie piana rivolta verso l'esterno) con un angolo tale da illuminare un'area dove verrà posizionata la cella. Le lenti prismatiche sono ottiche non imaging, cioè non formano nessuna immagine della sorgente, massimizzando in questo modo l'energia convogliata al ricevitore.

Per quanto riguarda le ottiche riflessive si utilizzano sostanzialmente degli specchi parabolici, anche detti concentratori parabolici o paraboloidi. Essi consentono in generale di ottenere concentrazioni molto elevate ed evitare i problemi legati all'aberrazione cromatica tipici delle lenti di Fresnel. Gli specchi possono essere di tipo singolo, con concentrazione della luce solare su un punto focale distanziato dal sistema ottico, oppure doppi, con abbinamento di uno specchio concavo a uno specchio convesso o piano (inverted mirror) e concentrazione della radiazione solare sulla superficie dello specchio di dimensioni maggiori. Gli specchi per sistemi a concentrazione sono solitamente realizzati con film ad alta riflettività, come ad esempio quelli costruiti con film di alluminio di differenti spessori con finiture in argento che consentono di avere riflettività fino al 95%. [9]

Si possono realizzare strutture a specchi multipli dotate di decine o centinaia di specchi, piani oppure di forma curva montati su una stessa struttura in acciaio. Gli specchi riflettono la luce solare, concentrata anche 1000 volte o più, verso un ricevitore posto nel fuoco della parabola, che fa pervenire la luce a un modulo fotovoltaico.



Figura 18 Impianto CPV con concentratore parabolico a specchi multipli

Nel caso di sistemi CPV Dense-Array, la luce viene concentrata tramite specchi parabolici e a differenza dei sistemi Point-Focus, le celle solari presentano una superficie abbastanza estesa (dell'ordine di qualche cm^2) e sono disposte una vicina all'altra. Questi sistemi consentono di raggiungere concentrazioni molto elevate, ma per il loro corretto funzionamento è necessaria un'elevata precisione nella lavorazione degli specchi, molto maggiore di quella richiesta per le lenti di Fresnel. Inoltre, a causa dell'alta concentrazione, bisogna garantire un'efficace sistema di dissipazione del calore predisponendo un sistema di raffreddamento di tipo attivo.

Infine ci sono i sistemi ibridi che abbinano l'utilizzo di sistemi in rifrazione con specchi per la riflessione. In molti casi gli specchi vengono utilizzati come elementi secondari che vengono

posizionati in prossimità del ricevitore, consentendo di aumentare sia l'efficienza di raccolta della luce, sia l'angolo di accettazione del sistema.

4.1.3 Sistema di Tracking e Inverter

I concentratori solari hanno un limite: riescono a convogliare efficacemente solo la radiazione solare diretta, equivalente all'80% della luce solare totale e rappresentata dai raggi che non cambiano angolo di incidenza arrivando pressoché paralleli sulla cella. L'asse ottico deve quindi essere allineato con la sorgente luminosa affinché il sistema fornisca il maggior quantitativo di energia possibile. Per questo motivo, a differenza degli impianti fotovoltaici tradizionali, bisogna utilizzare un sistema di tracking o inseguitore solare.

Siccome la posizione del sole nel cielo varia a seconda delle stagioni e dell'orario nell'arco della giornata, il sistema di tracking deve essere in grado di allineare il concentratore e il ricevitore solare con la massima precisione per garantire la massima efficienza. Infatti l'inseguitore solare deve essere in grado di tracciare al meglio i due moti fondamentali del sole: moto giornaliero, corrispondente ad una rotazione sul suo asse baricentrico da est a ovest seguendo il cammino giornaliero apparente del sole; moto annuale, relativo ad una rotazione rispetto al piano orizzontale seguendo le elevazioni variabili del sole nell'arco dell'anno. La precisione richiesta per l'inseguitore solare è legata all'angolo di accettazione del sistema ottico di concentrazione, quindi è importante che il tracker abbia una precisione angolare inferiore all'angolo di accettazione del sistema.

Ci sono diverse tipologie di sistemi di tracking che variano in base al costo, alla complessità dell'apparato e al grado di precisione raggiunto. Principalmente si suddividono in due categorie: tracker ad un asse di rotazione e tracker a due assi.

Per quanto riguarda gli inseguitori ad un asse, permettono la rotazione solamente su una direzione: verticale o orizzontale. La scelta di quale asse di rotazione preferire viene fatta a seconda del luogo prescelto per l'impianto: nelle regioni tropicali in cui il sole è molto alto a mezzogiorno ma la durata della giornata è breve, è preferibile usare quello con asse orizzontale; nelle località caratterizzate da alte latitudini, dove il sole non raggiunge altezze elevate ma i cui giorni estivi sono lunghi, si predilige il sistema avente l'asse verticale.

Per quanto concerne i tracker a due assi, possono ruotare sia in verticale e in orizzontale e quindi possono tracciare il moto apparente del sole praticamente in ogni parte del mondo.



Figura 19 Sistema di tracking a due assi

Gli elementi principali che caratterizzano il sistema di tracking sono i seguenti:

- Algoritmo di tracciatura del sole: l'insieme delle istruzioni che servono a calcolare l'angolo zenitale e azimutale del sole usati per posizionare correttamente il concentratore verso il sole. Alcuni di questi algoritmi sono basati su consultazioni astronomiche, altri invece, mediante un sensore, analizzano le rivelazioni in tempo reale dell'intensità luminosa;
- Sistema di posizionamento: l'apparato, elettrico o idraulico, che muove il concentratore e il ricevitore in modo tale da puntare verso il sole con il giusto angolo. Quello di tipo elettrico utilizza codificatori e azionamenti a frequenza variabile (o attuatori lineari) per monitorare la posizione corrente del pannello e muoverlo nella posizione designata dall'unità di controllo;
- Unità di controllo: esegue gli algoritmi per la tracciatura solare e coordina i movimenti del sistema di posizionamento;
- Meccanismo di azionamento e trasmissione: gli apparati meccanici e idraulici che permettono al sistema di posizionamento di muoversi. Comprendono attuatori e azionamenti lineari, cilindri idraulici, dischi girevoli, viti senza fine, ingranaggi planetari e mandrini filettati;
- Sensore di rilevamento: solarimetro, usato nei sistemi di tracking che si basano sulle rilevazioni in tempo reale dell'intensità luminosa. Per ottimizzare l'efficienza e la potenza in uscita si possono monitorare le condizioni ambientali come pressione, temperatura e umidità. Infine si utilizzano altri sensori come l'anemometro per misurare la velocità e pressione del vento (in caso di venti troppo forti i pannelli vengono portati in una posizione orizzontale di sicurezza), interruttori di fine corsa per controllare la velocità e impedire spostamenti non consentiti ai pannelli al fine di evitare il danneggiamento degli stessi e un inclinometro che fornisce il feedback sull'elevazione e l'angolo di inclinazione. [10]

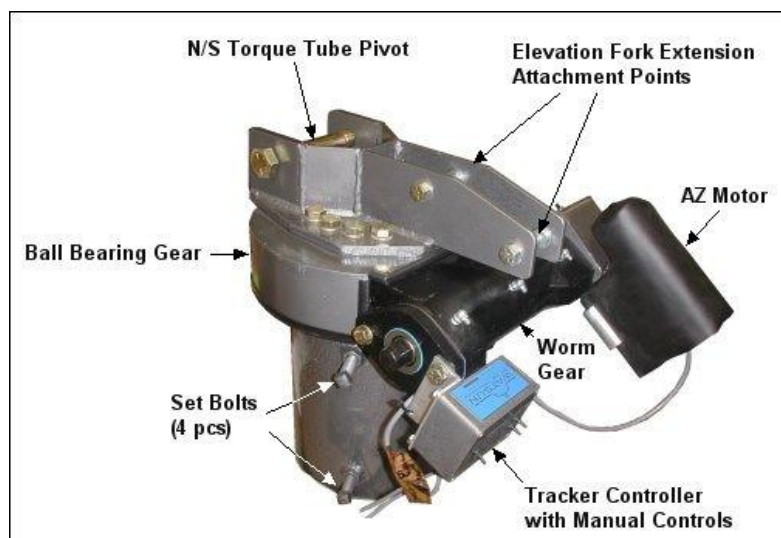


Figura 20 Sistema di posizionamento di un inseguitore solare

Per quanto riguarda l'inverter, si tratta di un dispositivo adibito alla conversione della potenza da corrente continua a corrente alternata. Inoltre svolge anche la funzione di regolazione della tensione e della frequenza per renderle compatibili agli utilizzatori incorporando al suo interno un trasformatore. Ci sono sostanzialmente due tipologie di inverte: l'inverter per impianti stand-alone, il quale non è interfacciato alla rete elettrica e può essere alimentato sia in corrente continua (dalle batterie) che in corrente alternata e l'inverter collegato alla rete, avente una tensione sinusoidale in uscita sincronizzata con quella della rete grazie ai computer integrati che rilevano la forma d'onda dei parametri di rete e non fornisce energia di backup in caso di scollegamento del carico.

Per il dimensionamento sulla parte a corrente continua, il punto da considerare è la connessione dei moduli fotovoltaici con l'inverter. Qui si distinguono varie tipologie: inverter centrali, di stringa e multistringa (per stringa si intende una fila di moduli fotovoltaici collegati in serie). Gli inverter multistringa dispongono di due o più entrate di stringa, con inseguitore MPP (Maximum Power Point) dedicato: un sistema di rilevamento del punto di massima potenza della caratteristica I-V, che può variare a seconda della luminosità e della temperatura, garantendo un trasferimento di potenza ottimale. Sono raccomandabili soprattutto se il generatore fotovoltaico è composto da numerose superfici parziali o se è parzialmente ombreggiato. Nonostante la loro grande potenza, gli inverter centrali possiedono un unico inseguitore MPP. Essi sono particolarmente idonei per grandi impianti con generatore omogeneo.

Gli inverter devono contenere al minimo il proprio consumo e avere al proprio interno sistemi di protezione contro corto circuito, tensioni troppo alte o basse provenienti sia dai moduli in CC (corrente continua) che dalla rete in CA (corrente alternata) e sovratemperature. Un'altra misura di sicurezza prevede che l'inverter si disconnetta se non percepisce la presenza della rete elettrica; infatti, anche se la rete di trasmissione è scollegata, i pannelli potrebbero produrre attivamente energia elettrica e alimentare il circuito locale, dando così origine al fenomeno chiamato effetto isola. In questa condizione l'inverter non può immettere potenza per un periodo limitato finché non rileva le corrette frequenza e tensione della rete; se ciò avvenisse il sistema fotovoltaico potrebbe alimentare dei trasformatori o altre macchine e dare origine a potenziali di migliaia di volt potenzialmente pericolosi. Se anche il carico fosse perfettamente bilanciato dalla produzione elettrica dell'impianto, l'inverter non deve funzionare. La protezione anti-isola comprende dunque degli algoritmi che verificano costantemente che la griglia di trasmissione sia effettivamente presente.

Avere a disposizione un ampio intervallo per i parametri in corrente continua in entrata è fortemente desiderabile visto che anche gli array funzionano in un ampio intervallo di tensione; dato che la tensione in entrata lato CC deve essere più grande del valore di picco della tensione in uscita lato CA, un margine maggiore permette un miglior controllo del sistema. Per ottenerlo si possono usare inverter con un trasformatore ad alta frequenza al proprio interno, facendo però aumentare il costo dell'impianto.

Dal punto di vista termico si deve cercare di diminuire al massimo le perdite e contenere il più possibile l'aumento di temperatura degli elementi interni dell'inverter, cercando al contempo di minimizzare al massimo i costi di raffreddamento. Se non è possibile, i vari componenti devono essere separati in differenti zone isoterme all'interno del contenitore stesso dell'inverter, soprattutto in caso di componenti sensibili alla temperatura come condensatori, semiconduttori e altri apparati elettronici. Infine, dotare l'inverter di un involucro resistente alle intemperie, in caso ottimale con grado di protezione IP65 (protezione contro polvere, frammenti e getti d'acqua), permette il montaggio all'esterno e in qualsiasi luogo dell'inverter. Installarlo il più vicino possibile ai moduli, permette di diminuire l'onere dovuto alla posa dei relativamente costosi cavi CC. [11]



Figura 21 Inverter installato sulla struttura di sostegno

Come accennato prima, un inverter intelligente include inoltre un sistema di rilevamento del punto di massima potenza della caratteristica I-V (MPP). Infatti, le condizioni di utilizzo della cella solare fanno sì che produca un'uscita non lineare a causa della radiazione solare, temperatura di esercizio e resistenza totale. Per questo, lo scopo del MPP consiste nel campionare l'uscita generata dal modulo fotovoltaico e applicare la resistenza di carico più consona ad ottenere la massima potenza. Il rendimento di conversione dell'inverter è molto importante per avere la massima energia dai pannelli fotovoltaici. Recentemente con i progressi tecnologici nei transistor si hanno efficienze che si attestano intorno al 97.5%, con punte del 98.5% se si utilizzano SiC MOSFET (silicon carbide metal-oxide-semiconductor field-effect transistor).

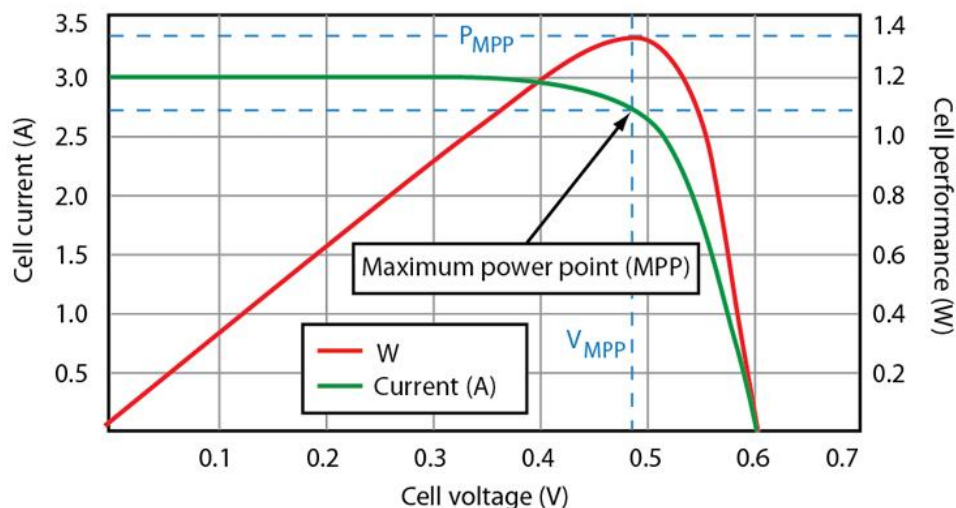


Figure 4. A PV cell's exponential relationship between current and voltage results in the maximum power point at the knee of the current-versus-voltage curve.

Figura 22 Grafico MPP di una cella solare

Capitolo 5

Cella a Multigiunzione

5.1 Caratteristiche

In ogni impianto fotovoltaico, l'elemento principale nonché determinante nella resa produttiva dell'intero sistema è sicuramente la cella fotovoltaica. A maggior ragione negli impianti fotovoltaici a concentrazione (CPV), il cui punto di forza è l'efficienza. Ne consegue quindi che la scelta della miglior cella da usare in questi impianti sia fondamentale. Ed è qui che entra in gioco una nuova tipologia di cella, differente da quelle comunemente usate negli altri tipi di impianti fotovoltaici: la cella a multigiunzione.

Come si può dedurre dal nome, la cella multigiunzione è formata da vari substrati di materiali semiconduttori adagiati uno sopra l'altro in modo tale da formare altrettante giunzioni p-n dalle caratteristiche volute.

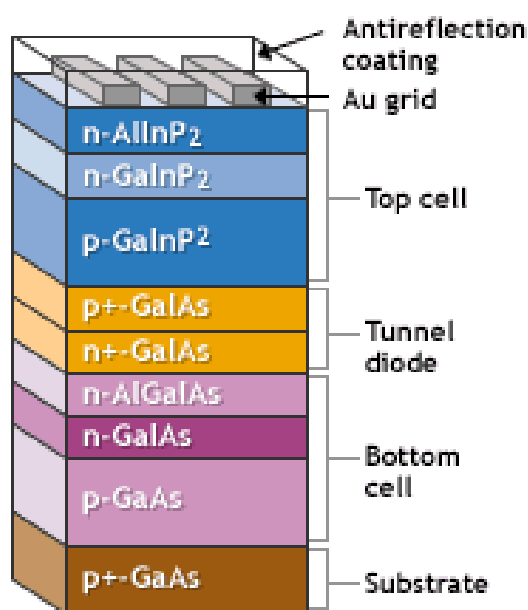


Figura 23 Struttura Cella Multigiunzione

In questo modo, alternando sapientemente i vari layer di materiale semiconduttore è possibile catturare la maggior parte di spettro di luce e convertirlo in energia elettrica in modo più efficace rispetto alla classica cella monogiunzione in silicio.

Consideriamo lo spettro di luce solare suddividendolo nelle varie lunghezze d'onda e distribuiamolo su di una varietà di materiali semiconduttori mediante un prisma. In questo modo possiamo scegliere quale materiale semiconduttore cattura la maggior porzione di spettro luminoso. Questo approccio però, anche se teoricamente possibile, non sarebbe possibile nella pratica visto che sarebbe problematico mantenere meccanicamente una tale struttura.

Per questi motivi la soluzione migliore per ottenere un maggior assorbimento dello spettro luminoso consiste nell'impilare o far crescere (a seconda della metodologia costruttiva utilizzata) una sopra

l'altro i vari layer di materiale semiconduttore con bande energetiche (bandgaps) decrescenti. Così facendo i layer superiori, avendo il bandgap più elevato, assorbono i fotoni aventi la più alta energia luminosa e lasciano passare quelli con la più bassa energia in modo tale che venga assorbita mano a mano dai layer sottostanti. Quindi, per ottenere il massimo assorbimento dello spettro luminoso, bisogna scegliere accuratamente i materiali semiconduttori più idonei a ricevere i fotoni appartenenti alle varie lunghezze d'onda e disporli in modo appropriato nella struttura a stack che si vuole realizzare.

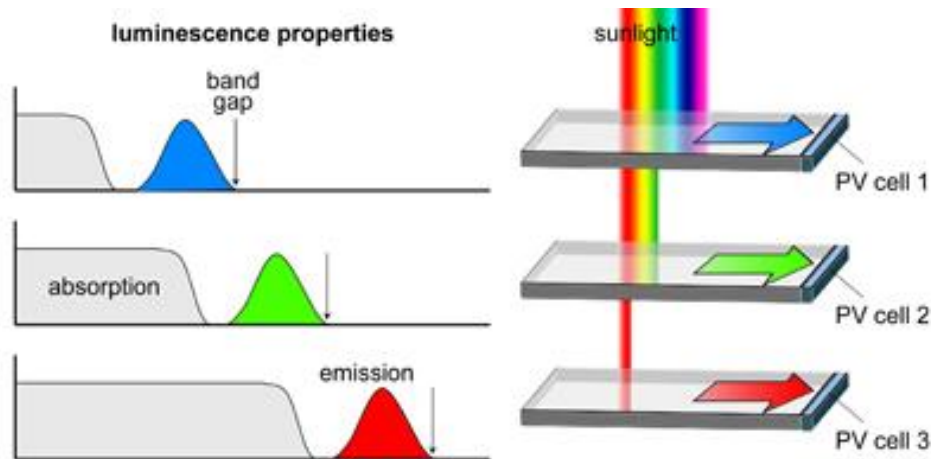


Figura 24 Assorbimento spettro luminoso nei vari layer con bandgaps decrescenti

Sono le leghe formate con gli elementi del III e del V gruppo che meglio si comportano nella realizzazione di questa struttura: Fosforo di Indio (InP), Antimoniuro di Gallio (GaSb) e l'Arseniuro di Gallio (GaAs). Regolando attentamente le composizioni di questi elementi, si possono ottenere svariati valori di bandgaps e quindi raggiungere le efficienze desiderate: elementi con bassi valori di bandgaps assorbono maggior spettro luminoso generando una più elevata corrente a scapito però di una bassa tensione di circuito aperto incapace di superare il bandgap del materiale. Di contro, elementi con alti valori di banda energetica assorbono meno energia luminosa generando una bassa corrente ma producono un'elevata tensione di circuito aperto. Il giusto compromesso tra queste due caratteristiche comporta il raggiungimento di un alto valore di efficienza. Analizziamo ora le tipologie costruttive e le tecniche realizzative delle celle multigiunzione. [12]

5.2 Processo Produttivo

Le celle a multigiunzione, come detto, sono realizzate sovrapponendo varie sottocelle aventi bandgaps diversi una sopra l'altra. La soluzione più facile per produrle consisterebbe nell'usare due o più celle solari a film sottili separate meccanicamente e collegarle tra loro all'esterno della cella. Purtroppo questa tecnica, usata largamente nella produzione di celle costituite da silicio amorfo, raggiunge una bassa efficienza (8-9%). Per questo motivo, si deve usare la soluzione di più difficile realizzazione: la cella integrata monoliticamente, che consiste in vari strati (layer) connessi meccanicamente ed elettricamente. La difficoltà di questa produzione consiste nel fatto che le caratteristiche elettriche di ogni layer devono essere abbinate correttamente; in particolare, la corrente generata dai fotoni assorbiti da ogni layer deve essere accoppiata, altrimenti si avrà un

assorbimento parassita di elettroni tra i vari strati. Esaminiamo nel dettaglio questo processo produttivo.

Si parte da un wafer grezzo (di norma di Germanio) e si formano, mediante crescita epitassiale (la stessa metodologia usata nella crescita dei cristalli), vari strati di semiconduttore cristallino al di sopra del substrato di partenza. Vi sono varie tipologie di crescita epitassiale: LPE (Liquid Phase Epitaxy), MBE (Molecular Beam Epitaxy), MOMBE (Metal-Organic Molecular Beam Epitaxy), HVPE (Hydride Vapour Phase Epitaxy) e OMVPE (Organo-Metallic Vapor-Phase Epitaxy).

La più usata è la OMVPE che consiste nell'iniettare del gas ultra puro nel reattore (una camera speciale che non reagisce con gli elementi chimici usati) dosandolo finemente per far depositare uno strato molto sottile di atomi sul wafer semiconduttore scelto come substrato. La reazione superficiale dei composti organici, metallo-organici e degli idruri contenenti gli elementi chimici richiesti, crea le condizioni per la crescita epitassiale cristallina dei composti semiconduttori.

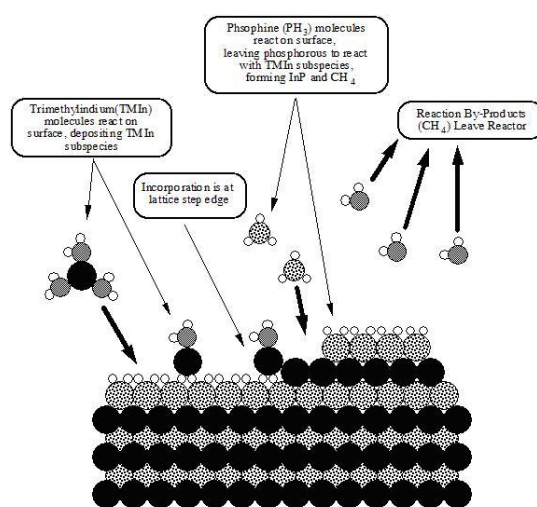


Figura 25 Processo Crescita Cristallina mediante OMVPE

La crescita epitassiale è necessaria affinché la cella a multigiunzione raggiunga un'alta efficienza; solo una vera crescita epitassiale può garantirlo, a differenza del solo deposito di materiale policristallino sul substrato che si potrebbe facilmente ottenere con la tecnica CVD (Vapor Phase Deposition).

Per ottenere la trasparenza ottica e la massima conduttività di corrente tra le celle superiore e inferiore, tutti i livelli devono avere strutture cristalline e reticoli simili. Per questo motivo è importante tenere in considerazione la costante di reticolo (o parametro di cella): rappresenta la misura della distanza dei vari atomi all'interno della struttura cristallina. E' conveniente avere le costanti di reticolo abbinate tra i vari layer visto che un eventuale disaccoppiamento creerebbe difetti e dislocazioni all'interno del reticolo con la possibilità di verificarsi centri di ricombinazione. Gli effetti della ricombinazione consistono nella perdita di portatori minoritari di carica foto generata (ad esempio ritorno degli elettroni dalla banda di conduzione a quella di valenza) e di un consistente degrado dell'efficienza fotovoltaica. Infatti questi eventi diminuiscono la densità di corrente di cortocircuito, la tensione di circuito aperto e il fattore di forma (Fill Factor), che rappresenta il rapporto tra corrente e tensione al fine di ottenere la massima potenza di uscita.

Anche se all'inizio è stato considerato un effetto secondario, il disaccoppiamento reticolare tra i vari layer è da tenere in seria considerazione: basta un piccolissimo (0,01%) valore di questo parametro per determinare un significativo degrado della qualità fotovoltaica. Quindi, oltre a scegliere i materiali in base ai loro bandgaps, bisogna valutarli anche in base alla loro costante di reticolo. [13]

5.3 Tipologie Costruttive 3-Junction Cell

Per ottimizzare al meglio le caratteristiche delle celle multigiunzione, i laboratori di ricerca hanno analizzato e sperimentato (e continuano a farlo) varie tipologie costruttive della struttura della cella variando i seguenti parametri: numeri di layer per cella, composti semiconduttori usati, numero giunzioni, composizione substrato. Ogni variazione di questi parametri comporta determinati benefici ma anche svantaggi e quindi bisogna trovare il giusto compromesso per ottenere la più alta resa produttiva possibile abbinata ad un costo contenuto.

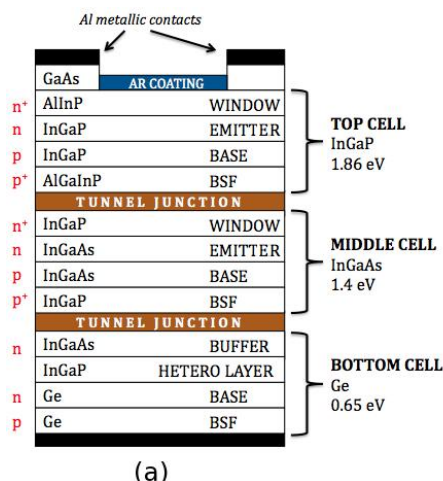
Analizziamo quindi le tre principali tipologie costruttive usate nella produzione di celle multigiunzione aventi 3 giunzioni (3-junction cell) evidenziandone pregi e difetti.

5.3.1 Lattice-Matched

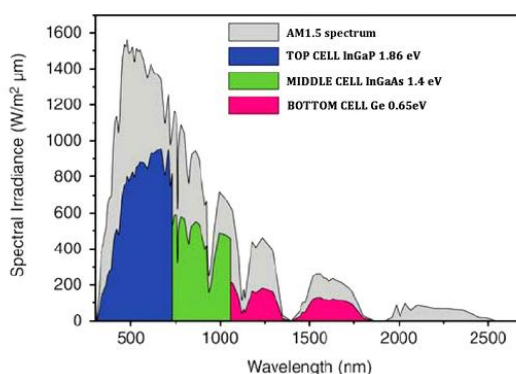
La prima struttura usata nella realizzazione di celle multigiunzione è la composizione Lattice-Matched, che a tutt'oggi risulta ancora la più diffusa. Questa struttura consiste in una serie di layer ultra sottili formati da composti semiconduttori a singolo cristallo del III e V gruppo aventi composizioni chimiche diverse ma accomunati dalla stessa costante di reticolo (da qui il loro nome Lattice-Matched, ovvero a reticolo accoppiato).

Tipicamente una struttura Lattice-Matched è costituita da 3 giunzioni, chiamate anche subcell: la top cell, composta da GaInP, la middle cell da GaInAs e la bottom cell formata da Ge.

Le giunzioni sono formate mediante crescita epitassiale a partire da uno substrato semiconduttore: la giunzione superiore della struttura punta verso il sole e presenta il valore più alto di energia di bandgaps catturando quindi lo spettro luminoso caratterizzato da lunghezze d'onda corte. I fotoni aventi energia inferiore al bandgap della top cell passano alla cella sottostante e quelli con energia ancora più inferiore del bandgaps della middle cell passano oltre per venire finalmente catturati dalla bottom cell.



(a)



(b)

Figura 26 Struttura Cella Multigiunzione Lattice Matched

Figura 27 Grafico Radiazione Luminosa e Lunghezza d'onda

Per realizzare una struttura di questo tipo, bisogna far fronte ad alcuni accorgimenti che altrimenti potrebbero vanificare la qualità fotovoltaica e diminuire l'efficienza. Innanzitutto l'intera struttura deve essere realizzata sullo stesso substrato, ovvero la struttura atomica del dispositivo deve essere simile nella disposizione atomica e deve fornire le diversità di bandgaps necessarie alla formazione delle giunzioni.

In secondo luogo, la struttura deve essere formata da layer realizzati usando materiali di alta qualità al fine di assorbire efficacemente gli elettroni portatori minoritari e le lacune. Inoltre, all'interno di queste strutture, si possono trovare materiali qualitativamente notevoli che fungono da layer inattivi per permettere le dinamiche proprie della generazione dei portatori: questi layer includono delle superfici anteriori e posteriori di passivazione tipicamente aventi un'energia di bandgap superiore ai layer attivi presenti nella cella.

Infine, bisogna ottenere e controllare una vasta quantità di livelli di drogaggio dei composti semiconduttori: questo accorgimento è necessario visto che stiamo costruendo una struttura integrata monoliticamente e dobbiamo interconnettere ogni sub-giunzione adiacente, invertendo quindi le polarità n-p nel mezzo delle subcelle. Ad esempio, nel caso di una cella solare connessa in serie avente una singola polarità, questi layer fungono da giunzioni di tunnel (tunnel-junctions) agendo come diodi configurati in polarità inversa rispetto alla configurazione originale dello stack, permettendo in questo modo il passaggio dei portatori attraverso la giunzione e l'attraversamento in verticale della corrente nel dispositivo.

Trattandosi di una struttura integrata monoliticamente e connessa in serie, bisogna considerare anche alcuni accorgimenti elettrici relativi allo stack, di cui il più importante è il bilanciamento della corrente tra le subcelle. Visto che le giunzioni sono connesse in serie, la tensione dei diodi si somma mentre la corrente circolante è bloccata dalla subcella che ne produce meno. Da notare che finché le giunzioni di tunnel sono realizzate in polarità inversa, diminuisce la tensione che sottraggono alla tensione totale del dispositivo.

Un aspetto fondamentale nella struttura risiede nella scelta delle combinazioni di bandgaps visto che la densità di corrente delle subcelle dipende dal bandgap: materiali con ampi bandgap producono basse densità di corrente. In una 3-junction cell ideale e usando uno spettro luminoso realizzato in laboratorio, i tre livelli di bandgap ottimali risultano: 1,7eV per la top cell, 1,1eV per la middle cell e 0,67eV per la bottom cell. Nella realtà invece, una tipica cella formata da GaInP/GaAs/Ge raggiunge valori di bandgap leggermente più alti: 1,9eV/1,4eV/0,67eV. Questo discostamento provoca che la corrente prodotta nella bottom cell (Ge) sia in eccesso di un fattore 2 rispetto a quelle generate nelle altre due giunzioni. E siccome la bottom cell è quella delle tre avente la minor energia di bandgap, la potenza che potrebbe derivare dalla cattura dell'alta energia luminosa da parte della middle cell è persa e trasformata in calore. Teoricamente l'efficienza massima raggiungibile si aggira sul 41%.

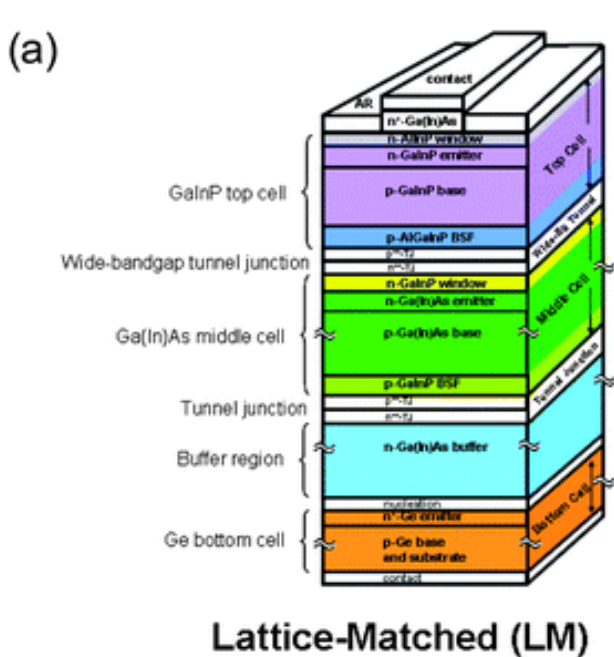


Figura 28 Schema fisico cella multigiunzione Lattice Matched

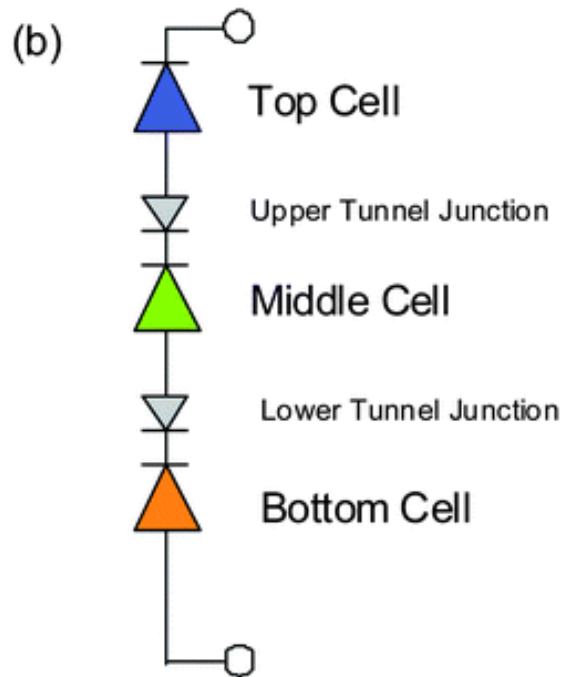


Figura 29 Circuito elettrico equivalente

5.3.2 Metamorphic e Inverted Metamorphic

Di recente concezione sono invece le celle Metamorphic (MM) e Inverted Metamorphic (IMM). Entrambe presentano la stessa struttura delle Lattice Matched composta da tre subcelle aventi energie di bandgap diverse ma con alcune differenze. In una tipica 3 junction cell formata da GaInP/GaInAs/Ge, la top e la bottom cell sono fatte crescere al di sopra di un buffer di tipo metamorfico in modo tale da avere queste due subcell di tipo Lattice Matched tra loro, ma di tipo Lattice Mismatched (o Metamorphic) rispetto alla bottom cell in Ge.

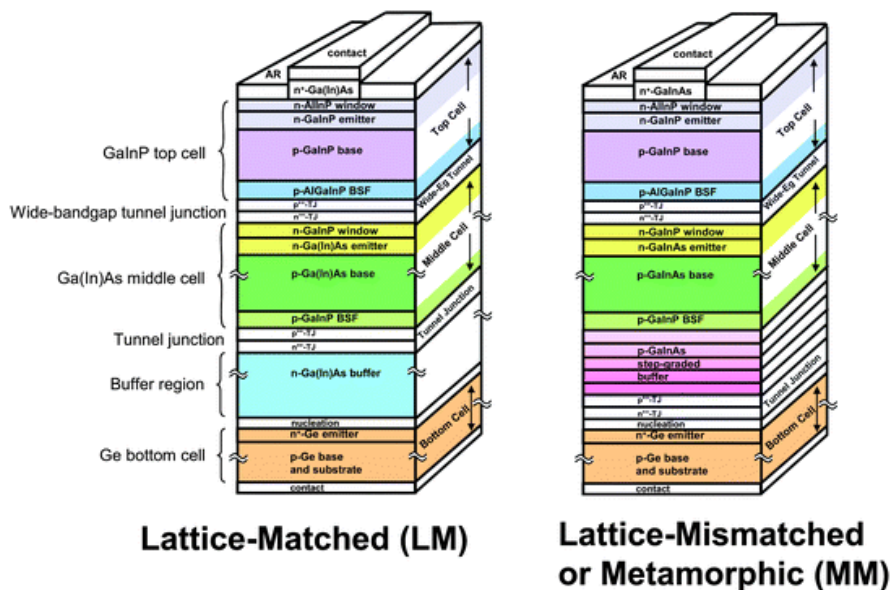


Figura 30 Struttura Lattice-Matched e Lattice Mismatched a confronto

Un design avente costante di reticolo disaccoppiata permette la realizzazione della bottom e middle cell aventi energie di bandgap inferiori rispetto alle controparti realizzate mediante struttura Lattice-Matched, consentendo così la realizzazione di una combinazione di bandgap migliore per la conversione dello spettro solare.

Nella struttura Metamorphic viene utilizzato un buffer metamorfico di tipo graduale per permettere il passaggio della costante di reticolo dal substrato a quella delle celle superiori. Questo buffer è realizzato con composti semiconduttori a basso drogaggio e con una formazione residua molto piccola che comporta la comparsa di dislocazioni reticolari all'interno delle celle attive superiori. Infatti, la struttura a reticolo disaccoppiato, produce dislocazioni nella struttura cristallina delle celle, provocando un abbassamento del tempo di vita dei portatori minoritari e quindi una riduzione dell'efficienza della cella. Per ovviare a questo, bisogna utilizzare un adeguato buffer metamorfico per minimizzare queste dislocazioni che si verificano nelle regioni attive delle subcelle. Il cambiamento dell'efficienza quantica nelle subcelle superiori di una 3 junction cell formata da GaInP/GaInAs/Ge è dovuto dall'alta composizione dell'Indio e dalle basse energie di bandgap delle due subcell in GaInP e GaInAs, la cui struttura metamorfica permette di assorbire parte della densità di corrente che altrimenti andrebbe persa nella subcella inferiore in Ge.

Nel caso dell'altra struttura Lattice-Mismatched, la Inverted Metamorphic (IMM), la bottom cell è rimpiazzata da una subcella metamorfica di tipo GaInAs avente energia di bandgap vicino a 1eV, fatta crescere sopra ad una configurazione invertita (da qui il nome Inverted).

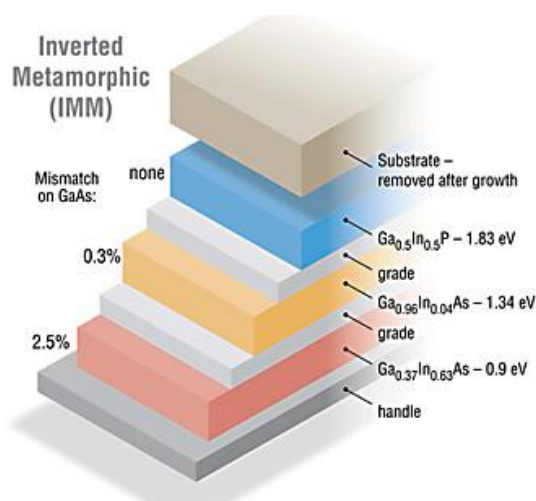


Figura 31 Struttura di una Inverted Metamorphic (IMM) Cell

In questa tipologia di struttura è molto facile farci crescere le due celle superiori di GaInP e GaInAs con i bandgaps desiderati e bassa costante di reticolo verso il substrato. In questo modo le due celle superiori si possono considerare Lattice-Matched rispetto al substrato e possono essere realizzate in due modi diversi: in posizione verticale (la classica crescita partendo dalla bottom cell e salendo verso l'alto) o in posizione invertita, nella quale il substrato si trova al di sopra di tutte le altre subcelle. In quest'ultimo caso, il substrato di crescita originale viene rimosso durante il processo di formazione della cella per permettere alla luce di penetrare nella superficie frontale delle celle che, in questo particolare caso, si trovano in configurazione invertita. In entrambi i casi, la subcella metamorfica formata da GaInAs e avente 1eV come energia di bandgap, è fatta crescere in modo invertito sopra ad una regione di buffer trasparente, metamorfico e graduato il quale trasmette la luce usata dalla subcella.

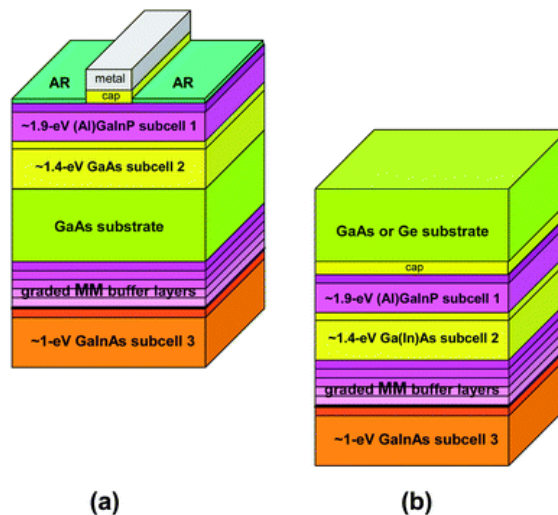


Figura 32 Due configurazioni di 3-junction cell Lattice-Mismatched a struttura invertita: (a) crescita in entrambe le direzioni di un substrato trasparente di GaAs; (b) crescita sul retro di uno substrato di Ge o GaAs rimosso poi durante la costruzione della cella

Le Inverted Metamorphic cell, grazie alla loro struttura che permette alla bottom subcella di raggiungere elevati valori di bandgap, riescono a raggiungere valori di tensione più elevati se comparati con quelli di una Lattice Matched.

5.4 4-Junction, 5-Junction e 6-Junction Cell

Recentemente si è cominciato a spingersi oltre le 3 giunzioni nella realizzazione di celle solari per sistemi fotovoltaici ad alta concentrazione. Come vedremo in seguito, più giunzioni comportano un incremento dell'efficienza della cella ma anche complicazioni strutturali. Analizziamo la struttura di una 4-junction cell evidenziandone le differenze e peculiarità rispetto ad una cella con 3 giunzioni.

Una tipica cella a 4 giunzioni è formata GaInP/AlGaAs/GaAs/Ge o in alternativa da AlInP/AlGaIn/GaIn/Ge e permette la suddivisione dello spettro solare disponibile sopra al bandgap della subcella GaInAs in 3 fasci, a differenza dei solo 2 disponibili per le celle a 3 giunzioni. Questo fatto comporta una diminuzione della densità di corrente pari ai $2/3$ rispetto alla corrispondente di una cella a 3 giunzioni e di conseguenza la potenza resistiva persa ($I^2 \cdot R$) diventa meno della metà rispetto alla stessa.

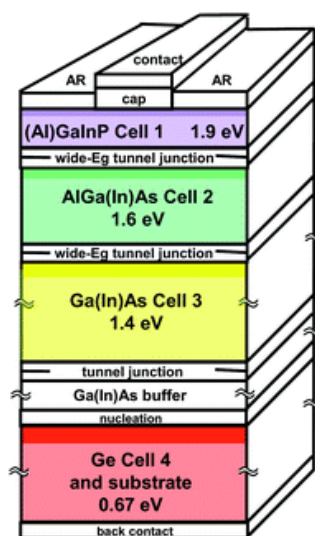


Figura 33 Sezione interna di una tipica 4-junction cell

Come per le celle a 3 giunzioni, possiamo scegliere tra diverse tipologie costruttive: Lattice-Matched se vogliamo avere delle subcelle con la stessa costante di reticolo del substrato, oppure Lattice-Mismatched (normale o invertita) se prediligiamo avere una maggior flessibilità nella scelta dei bandgap delle varie subcelle. Grazie a queste caratteristiche, l'efficienza teorica massima raggiungibile è del 58% con una realistica possibilità di raggiungere il 47% attraverso una struttura formata da GaInP/AlGaInAs/GaInAs/Ge e avente le seguenti energie di bandgap: 1,9/1,43/1,04/0,67eV.

Oltre alle celle a 4 giunzioni ci si è spinti anche oltre realizzando strutture a 5 e 6 giunzioni (quest'ultima soprattutto per usi spaziali). Il primo esemplare di cella a 5 giunzioni era costituito da subcelle in AlGaInP/GaInP/AlGaInAs/GaInAs/Ge ma poteva raggiungere un limite massimo di efficienza pari al 42%. Un'avanzata struttura della 5-junction cell composta da AlGaInP/AlGaInAs/GaInAs/GaInNAs/Ge ha permesso di raggiungere un'efficienza teorica del 55%: la sfida consiste nel realizzare un'ottima GaInNAs subcell che soffra il meno possibile della lunghezza di diffusione dei portatori minoritari che ostacolano la corretta formazione di un'alta intensità di corrente.

Per quanto riguarda le 6-junction cell, create a partire del 2004, siamo di fronte ad una struttura composta da: GaInP/GaInP/AlGaInAs/GaInAs/GaInNAs/Ge. Sperimentando una struttura di questo tipo, incorporando una subcell formata da GaInNAs con nitrurio diluito e avente un'energia di bandgap $\sim 1\text{eV}$, si può ottenere un'efficienza teorica pari al 58% e una tensione di ben 6V sotto concentrazione solare. Celle capaci di raggiungere così alte tensioni di circuito aperto sono ideali nella realizzazione di alcuni impianti a concentrazione solare che devono soddisfare determinati requisiti di design, ma purtroppo permettono di mettere insieme in serie solamente poche celle solari. [14]

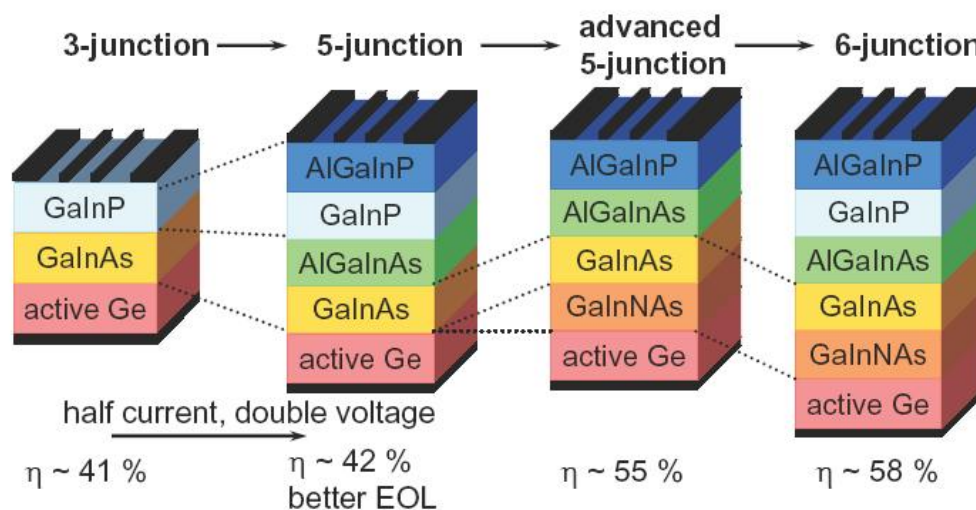


Figura 34 Comparativa struttura Cella Multigiunzione 3,5,6-junction cell con relativi valori teorici di efficienza

Conclusioni

Dopo questa breve panoramica sul fotovoltaico a concentrazione possiamo sicuramente affermare che è una delle strade più promettenti per la diffusione del fotovoltaico. Grazie all'utilizzo delle moderne celle a multigiunzione, tra cui la 3-junction e la 4-junction, in abbinamento con concentratori solari capaci di valori superiori ai 500 soli e avanzati sistemi di tracciamento solare, si possono raggiungere valori di efficienza di impianto inconcepibili fino a qualche anno fa (31.6% raggiunti dall'impianto CPV Amonix 7700 in Arizona). Purtroppo questa tecnologia di recente concezione soffre ancora di problemi di ottimizzazione e di distribuzione su larga scala, causati soprattutto da un prezzo ancora molto elevato e da processi produttivi per la cella a multigiunzione ancora acerbi e non del tutto efficienti. Inoltre, il fatto che i concentratori solari sfruttino solo la radiazione diretta e non quella diffusa obbliga a scegliere attentamente le aree geografiche su cui installare un impianto, tenendo anche conto della complessità e del peso della struttura di appoggio non indifferenti.

Ora come ora fatica ancora a inseguire le quote di mercato raggiunte dal fotovoltaico piano con moduli in silicio e dalla tecnologia eolica e idroelettrica, ma in un futuro non troppo lontano le cose potrebbe cambiare. E' infatti stimato che questa tecnologia possa consentire un dimezzamento del costo degli impianti fotovoltaici passando dagli attuali 3-4 €/Watt a 1,5-2 €/Watt con ancora ampi margini di miglioramento. Inoltre, la sempre più fame di energia da parte dei Paesi in via di sviluppo con il conseguente aumento dei combustibili fossili e loro relativa diminuzione in termini di disponibilità futura, potrebbe aprire definitivamente le porte agli impianti fotovoltaici a concentrazione. Senza contare che il riscaldamento globale causato anche dalle emissioni di gas serra sta comportando un aumento non trascurabile delle zone aride o desertiche, caratterizzate da cieli limpidi e forte irraggiamento solare diretto: l'ambiente ideale per le installazioni degli impianti fotovoltaici a concentrazione.

Bibliografia e Sitografia

- [1] 2013. [Online]. Available: <http://www.reteclima.it/piano-20-20-20-il-pacchetto-clima-energia-20-20-20/>.
- [2] «Lo spettro elettromagnetico e le finestre atmosferiche,» 30 04 2012. [Online]. Available: http://blogs.isisdavinci.it/valeria_alessandro/2012/04/30/lo-spettro-elettromagnetico/.
- [3] P. Würfel, *Physics of Solar Cells*, Weinheim: Wiley, 2005.
- [4] «Quale tipo di pannello fotovoltaico è il migliore, mono-, policristallino o a film sottile?,» 4 Marzo 2013. [Online]. Available: <http://www.infofotovoltaico.com/quale-tipo-di-pannello-fotovoltaico-e-il-migliore-mono-policristallino-o-a-film-sottile/>.
- [5] Consulente Eenergia, «LE CELLE FOTOVOLTAICHE A FILM SOTTILE,» [Online]. Available: <http://www.consulente-energia.com/b-celle-solari-fotovoltaiche-a-film-sottile.html>.
- [6] C. Seshan, «CPV: NOT JUST FOR HOT DESERTS!,» *IEEE*, 2010.
- [7] F. a. c. l. c. s. utilizzate, «<http://blog.crit-research.it/?p=2321>,» 8 Giugno 2011. [Online]. Available: <http://blog.crit-research.it/?p=2321>.
- [8] A. Royne, J. D. Christopher e D. R. Mills, «Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006.
- [9] «Fotovoltaico a concentrazione: le ottiche di focalizzazione,» 29 Giugno 2011. [Online]. Available: <http://blog.crit-research.it/?p=2391>.
- [10] Rockwell Automation, «Solar Tracking Application,» Febbraio 2011. [Online]. Available: <http://www.rockwellautomation.com/>.
- [11] SMA, «Inverter Solari,» Luglio 2012. [Online]. Available: <http://www.sma-italia.com/soluzioni/medium-power-solutions/know-how/inverter-solari-conoscenze-di-base-per-la-progettazione-di-impianti-fv.html>.
- [12] B. Burnett, «The Basic Physics and Design of III-V Multijunction Solar Cells,» Denver, 2002.
- [13] I. Bhattacharya e S. Y. Foo, «Effects of Gallium-Phosphide and Indium-Gallium-Antimonide Semiconductor Materials on Photon Absorption of Multijunction Solar Cells,» *IEEE*, 2010.
- [14] H. Cotal, . C. Fetzer, . J. Boisvert, G. Kinsey, R. King, P. Hebert, H. Yoon e N. Karam, «III–V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics,» *Energy Environ. Sci*, 2009.